

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ALIMENTACIÓN CON
ROTACIÓN SECUENCIAL PARA NUEVAS ANTENAS DE ESTACIONES DE
REFERENCIA DE SISTEMAS GNSS**

JUAN PEDRO LÓPEZ LOPESINO
Tutor: MIGUEL ALEJANDRO SALAS NATERA
Ponente: JOSÉ LUIS MASA CAMPOS

JULIO 2018

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ALIMENTACIÓN
CON ROTACIÓN SECUENCIAL PARA NUEVAS ANTENAS DE
ESTACIONES DE REFERENCIA DE SISTEMAS GNSS**

**AUTOR: JUAN PEDRO LÓPEZ LOPESINO
TUTOR: MIGUEL ALEJANDRO SALAS NATERA**

**Grupo de Radiofrecuencia, Antenas, Circuitos y Sistemas
Dpto. Tecnologías Electrónicas y de Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Julio de 2018**

Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en la optimización de la antena de referencia realizada previamente por María, así como el diseño de una red de alimentación para así dotar en recepción de una polarización circular a derechas en toda la banda de frecuencias especificada.

Inicialmente, se parte del diseño realizado en TFGs anteriores [1, 2], y sobre este diseño se propone mejorar la respuesta del parámetro S_{11} en toda la banda de frecuencias especificada (1.2-1.6 GHz), además se va a buscar una mayor estabilidad en el centro de fase. Para conseguir estos objetivos parciales se ha modificado la forma, tamaño y distancia del polarizador (dipolos), todo esto después de realizar un estudio y diversas simulaciones para obtener el mejor resultado posible.

Una vez optimizado el diseño consiguiendo mejorar la respuesta del parámetro S_{11} en todas las frecuencias; se pasa a estudiar las pérdidas de retorno (VSWR), la fase del parámetro S_{11} , la relación axial, el diagrama de la componente copolar y contrapolar, y la estabilidad del centro de fase para así reducir el error de precisión que se está buscando.

La segunda parte de este TFG consta de la realización de una red de alimentación con rotación secuencial. Esta red de alimentación consta de dos divisores y un híbrido (Branchline), con ello se pretende dotar de una polarización circular a derechas a la antena de referencia en toda la banda requerida por el sistema. Los componentes de dicha red (dos divisores y un Branchline) se van a diseñar primero por separado ajustando cada uno a su resultado óptimo, y posteriormente se procederá a la unión de dicha red a través de unas vías previamente diseñadas para así organizarla en diferentes capas para poder ajustarlo a las medidas de la antena de referencia.

Finalmente, como se tiene el diseño del elemento radiante y la red de alimentación por separado se pasa a la unión de ambos a través de los conectores SMA. Para conseguir que la unión sea correcta se ha tenido en cuenta la distancia a la que están los puertos de la antena y diseñarlos igual en la red de alimentación. Una vez se ha unido el diseño final se alimenta la antena a través de la red y se estudian los resultados finales, verificando que cumplen los requisitos y objetivos establecidos para la realización del TFG, así como viendo que cumple con las especificaciones de la mayoría de las antenas comerciales ya utilizadas en sistemas GNSS.

Abstract (English)

This Bachelor Thesis consists in the optimization of the reference antenna previously made by María, as well as the design of a feeding network to provide at the reception a circular polarization to the right in the entire frequency band specified.

Initially, it is part of the design realized in previous TFGs [1, 2], and on this design it is proposed to improve the response of the parameter S_{11} in all the frequency band specified (1.2-1.6 GHz), in addition a greater stability in the phase center will be sought. To achieve these partial objectives, the shape, size and distance of the polarizer (dipoles) have been modified, all these after carrying out a study and several simulations to get the best possible result.

Once the design has been optimized and the response of parameter S_{11} has been reduced in all frequencies; the VSWR, the phase of parameter S_{11} , the axial relationship, the diagram of the co-polar and cross-polar component and the stability of the phase center are studied to reduce the precision error that is being sought.

The second part of this TFG consists of the realization of a feeding network with sequential rotation. This feeding network consists of two dividers and a Branchline, with this is intended to provide a right circular polarization to the reference antenna in all the band required by the system. The components of said network (two divisors and a Branchline) are going to be designed first separately each one adjusting to its optimal result, and then the union of said network will be carried out through previously designed ways to organize it in different layers to be able to adjust it to the measurements of the reference antenna.

Finally, as you have the design of the radiating element and the feeding network separately, it is passed to the union of both through the SMA connectors. In order to ensure that the connection is correct, it has been necessary to take into account the distance to which the antenna ports are located and design them in the same way in the feeding network. Once the final design has been joined, the antenna is fed through the network and the final results are studied, verifying that they meet the requirements and objectives set for the completion of the TFG, as well as seeing that it complies with the specifications of most of the commercial antennas already used in GNSS systems.

Palabras clave (castellano)

Sistemas GNSS, GPS, elemento radiante, red de alimentación, parámetros S, centro de fase, cavidad, polarización circular a derechas, Branchline, divisores, dipolos, componente copolar, componente contrapolar, parche, conector SMA.

Keywords (inglés)

GNSS systems, GPS, radiant element, feeding network, S parameters, phase center, cavity, right circular polarization, Branchline, dividers, dipoles, co-polar component, cross-polar component, patch, SMA connector.

Agradecimientos

A mi familia por estar a mi lado apoyándome incondicionalmente durante toda la carrera y animándome en los momentos más duros. Además de creer siempre en mí y saber que lo seguirán haciendo toda la vida.

También dar las gracias a los profesores por habernos ayudado en la obtención de los conocimientos necesarios y prepararnos para el mundo laboral, aunque todo esto haya sido teniendo que sufrir y trabajar duro. Quiero dar especialmente las gracias a Miguel por dejarme hacer este TFG con él, por haberme guiado y ayudado en la realización del TFG. Además, agradecer a José Luis poder haber realizado este TFG y haberme ayudado con cualquier cosa que hemos necesitado durante el desarrollo.

Por último, agradecer a mis amigos por estar siempre para ayudarme cuando no salía alguna práctica, para resolver las últimas dudas antes de un examen o para consolarme si se suspende alguna asignatura.

Por todo esto gracias, y espero que la siguiente etapa que comienza sea tan buena y especial como esta.

Muchas gracias.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte	3
2.1	Alcance de la tecnología.....	3
2.1.1	Aplicaciones	3
2.1.1.1	Aplicaciones militares	3
2.1.1.2	Aplicaciones civiles.....	3
2.2	Tipos de elementos	7
2.2.1	Tipos antenas	7
2.2.2	Tipos redes alimentación	8
2.3	Marco Teórico	9
2.3.1	Definición de antena.....	10
3	Diseño.....	11
3.1	Diseños actuales	11
3.1.1	Exelis DM C146 Series GPS Antenna	11
3.1.2	Leica AR25 Choke Ring Antenna	11
3.1.3	Leica AR20 Choke Ring Antenna	11
3.1.4	Leica AR10 Integrated Antenna	12
3.1.5	Novatel GNSS-750	12
3.1.6	Novatel GPS-701-GG.....	12
3.1.7	Thales Choke Ring Antenna.....	13
3.2	Propuesta de diseño	15
4	Desarrollo	17
4.1	Selección de diseño	17
4.2	Elemento radiante	17
4.3	Red de alimentación	18
4.4	Diseño de componentes	18
4.4.1	Parche activo simple.....	18
4.4.2	Parche apilado.....	19
4.4.3	Polarizador.....	19
4.4.4	Cavidad.....	19
4.4.5	Red de alimentación	20
4.5	Resultados significativos de las simulaciones en la etapa de diseño.....	20
4.5.1	Elemento radiante	21
4.5.2	Elemento radiante con cavidad.....	25
4.5.3	Red de alimentación por separado.....	29
4.5.4	Red de alimentación unida	33
5	Integración, pruebas y resultados	35
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	39
6.1	Conclusiones.....	39
6.2	Trabajo futuro	40
7	Referencias	41
8	Glosario	43
9	Anexos	XLV
9.1	Diseño elemento y polarizador	XLV

9.2 Diseño red de alimentación	XLVI
9.3 Unión red de alimentación.....	XLIX
9.4 Diseño vías	L
9.5 Conceptos teóricos.....	LI
9.5.1 Polarización	LI
9.5.2 Relación axial	LII
9.5.3 Directividad y ganancia	LII
9.5.4 Centro de fase	LII
9.5.5 Bandas de frecuencia y longitud de onda	LII
9.5.6 Parámetros S	LIII
9.6 Requisitos del sistema	LIV
9.7 Comparativas	LV
9.7.1 Dipolos (Polarizador)	LV
9.7.2 Cavidad.....	LVI
9.7.3 Red de alimentación con o sin stubs (ADS)	LVII
9.7.4 Red de alimentación unida	LIX
9.8 Materiales	LIX
9.9 Programas utilizados	LX
9.10 Construcción.....	LXI

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: BANDA DE FRECUENCIAS DE GNSS [7]	6
FIGURA 2-2: TIPOS DE ANTENAS	8
FIGURA 2-3: TIPOS REDES DE ALIMENTACIÓN	9
FIGURA 2-4: ANTENA [8].....	10
FIGURA 3-1: ANTENAS COMERCIALES ACTUALES.....	13
FIGURA 3-2: COMPONENTES BAJO ESTUDIO	15
FIGURA 4-1: ELEMENTO RADIANTE.....	21
FIGURA 4-2: PARÁMETRO S_{11}	21
FIGURA 4-3: FASE PARÁMETRO S_{11}	21
FIGURA 4-4: RELACIÓN AXIAL	22
FIGURA 4-5: CARTA DE SMITH	22
FIGURA 4-6: CENTRO DE FASE Y SIGMA	23
FIGURA 4-7: VSWR.....	24
FIGURA 4-8: COMPONENTE COPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	24
FIGURA 4-9: COMPONENTE CONTRAPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	24
FIGURA 4-10: ELEMENTO RADIANTE CON CAVIDAD	25
FIGURA 4-11: PARÁMETRO S_{11}	25
FIGURA 4-12: FASE PARÁMETRO S_{11}	26
FIGURA 4-13: RELACIÓN AXIAL	26
FIGURA 4-14: CARTA SMITH	26
FIGURA 4-15: SIGMA Y CENTRO DE FASE	27
FIGURA 4-16: VSWR.....	28
FIGURA 4-17: COMPONENTE COPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	28
FIGURA 4-18: COMPONENTE CONTRAPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	29
FIGURA 4-19: BRANCHLINE.....	29

FIGURA 4-20: PARÁMETRO S11 DEL BRANCHLINE	30
FIGURA 4-21: FASE DEL BRANCHLINE	30
FIGURA 4-22: DIVISOR VERTICAL	30
FIGURA 4-23: PARÁMETRO S11 DEL DIVISOR VERTICAL	31
FIGURA 4-24: FASE DEL DIVISOR VERTICAL.....	31
FIGURA 4-25: DIVISOR HORIZONTAL	32
FIGURA 4-26: PARÁMETRO S11 DEL DIVISOR HORIZONTAL.....	32
FIGURA 4-27: FASE DEL DIVISOR HORIZONTAL.....	32
FIGURA 4-28: PARÁMETRO S11.....	33
FIGURA 4-29: FASE PUERTOS	33
FIGURA 5-1: ELEMENTO RADIANTE CON RED DE ALIMENTACIÓN.....	35
FIGURA 5-2: PARÁMETRO S11.....	35
FIGURA 5-3: FASE PARÁMETRO S11	35
FIGURA 5-4: RELACIÓN AXIAL	36
FIGURA 5-5: CARTA SMITH	36
FIGURA 5-6: VSWR.....	37
FIGURA 5-7: COMPONENTE COPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	37
FIGURA 5-8: COMPONENTE CONTRAPOLAR CON $\Phi=0$ Y $\Phi=90$	38
FIGURA 9-1: DISEÑO DIPOLOS	XLV
FIGURA 9-2: PARTE 1 DIVISOR.....	XLVI
FIGURA 9-3: DIVISOR VERTICAL	XLVI
FIGURA 9-4: DIVISOR VERTICAL CON STUB.....	XLVII
FIGURA 9-5: DIVISOR HORIZONTAL.....	XLVII
FIGURA 9-6: DIVISOR HORIZONTAL CON STUB.....	XLVIII
FIGURA 9-7: BRANCHLINE [9]	XLVIII
FIGURA 9-8: DISEÑO BRANCHLINE	XLIX

FIGURA 9-9: DISEÑO BRANCHLINE CON STUBS.....	XLIX
FIGURA 9-10: RED DE ALIMENTACIÓN	L
FIGURA 9-11: VÍAS.....	LI
FIGURA 9-12: ECUACIONES DEL CENTRO DE FASE [26].....	LII
FIGURA 9-13: BANDAS DE FRECUENCIA [8]	LIII
FIGURA 9-14: PARÁMETROS S [9]	LIV
FIGURA 9-15: DIPOLOS ÓPTIMOS.....	LV
FIGURA 9-16: DIPOLOS CORTOS	LV
FIGURA 9-17: DIPOLOS LARGOS	LVI
FIGURA 9-18: DIPOLOS CURVOS.....	LVI
FIGURA 9-19: CAVIDAD UNIFORME.....	LVI
FIGURA 9-20: CAVIDAD DISTINTO ESPESOR	LVII
FIGURA 9-21: DIVISOR VERTICAL	LVII
FIGURA 9-22: DIVISOR HORIZONTAL.....	LVII
FIGURA 9-23: DIVISOR VERTICAL	LVIII
FIGURA 9-24: DIVISOR HORIZONTAL.....	LVIII
FIGURA 9-25: RESPUESTA S11 DIVISORES	LVIII
FIGURA 9-26: RESPUESTA S11 DIVISORES CON STUB.....	LVIII
FIGURA 9-27: RED DE ALIMENTACIÓN SIN CAMBIOS	LIX
FIGURA 9-28: RED DE ALIMENTACIÓN VARIANDO STUBS	LIX
FIGURA 9-29: RED DE ALIMENTACIÓN PONIENDO STUBS HACIA FUERA	LIX
FIGURA 9-30: CST	LX
FIGURA 9-31: ADS	LXI
FIGURA 9-32: LINECALC.....	LXI

INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: DETALLES SOBRE EL GNSS ACTUAL [5].....	5
TABLA 3-1: COMPARATIVA [1] DE LAS ANTENAS COMERCIALES DE THALES [19], LEICA [16], NOVATEL [17], TRIMBLE Y EXELIS [15]	13
TABLA 4-1: CENTRO DE FASE Y SIGMA	23
TABLA 4-2: CENTRO DE FASE.....	27
TABLA 5-2: VALORES DE DIRECTIVIDAD Y ANCHO DE HAZ PARA COPOLAR Y CONTRAPOLAR.....	37
TABLA 9-1: MEDIDAS DE LOS DIPOLOS	XLV
TABLA 9-2: IMPEDANCIAS DEL BRANCHLINE	XLVIII
TABLA 9-3: BANDAS DE FRECUENCIAS [8].....	LII
TABLA 9-4: REQUISITOS.....	LIV
TABLA 9-5: CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO FINAL.....	LIV
TABLA 9-6: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	LIX
TABLA 9-7: MATERIALES DEL ELEMENTO RADIANTE	LX
TABLA 9-8: MATERIALES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN	LX

1 Introducción

1.1 Motivación

Este trabajo de fin de grado (TFG) busca optimizar una antena de referencia para GNSS, para obtener una mejor respuesta en todo el ancho de banda requerido desde 1.2 GHz hasta 1.6 GHz. En trabajos previos [1, 2] se analizó el ancho de banda y el ancho de haz para conseguir una respuesta en frecuencia que concuerde con las necesidades para el buen funcionamiento de los sistemas de navegación, también, además de esto se mejoró la estabilidad del centro de fase.

En este TFG, aparte de mejorar también el ancho de banda y la estabilidad del centro de fase, se ha implementado una cavidad para mejorar sus prestaciones cuando se utilice en un array de antenas. Para finalizar se ha diseñado una red de alimentación con un gran ancho de banda para así conseguir dar una polarización circular a derechas.

Actualmente los sistemas GNSS están experimentando un aumento considerable en cuanto a su uso debido a la importancia que se le está dando en una gran cantidad de dispositivos y aplicaciones de uso cotidiano.

Los sistemas de posicionamiento surgieron con uso únicamente militar, pero con el paso del tiempo, al ver la gran utilidad que se les podía dar y como consecuencia de la revolución tecnológica, ahora se hacen indispensables también para un uso civil. En este sentido, algunos dispositivos como por ejemplo aviones, coches, barcos o teléfonos móviles no nos los podríamos imaginar sin la ayuda de dichos sistemas.

Por eso, en este TFG se ha trabajado en el diseño de una antena de referencia con su respectiva red de alimentación para estos sistemas, con el fin de mejorar algunas características, pero sobre todo para conseguir mejorar la precisión en el sistema de posicionamiento que está desarrollando Europa (Galileo), ya que al final es uno de los factores más difícil de conseguir, pero a su vez es uno de los más importantes dentro de estos sistemas.

1.2 Objetivos

Por los motivos expuestos anteriormente, con este TFG se pretende mejorar aspectos importantes a tener en cuenta en el diseño de una antena que se va a utilizar en sistemas GNSS.

Los objetivos que se han tenido que cumplir son los siguientes:

- Diseño de la antena modificando la forma de los dipolos para así conseguir una mejor respuesta del parámetro S11, así como de la relación axial.
- Optimización de un elemento que comprenda toda la banda de frecuencias de los sistemas GNSS (1.2 GHz – 1.6 GHz)
- Disminución del rizado en el frente de fase y obtención de un centro de fase más estable, para así conseguir un menor error en la posición y mayor precisión en los sistemas GNSS.
- Implementación de una cavidad para eliminar las corrientes al utilizar el elemento como parte de un array.

- Implementación de una red de alimentación para poder dotar de una polarización circular a derechas, además de conseguir el ancho de banda requerido por el sistema.
- Unión del elemento radiante con la red de alimentación para obtener los resultados finales de acuerdo a lo establecido para las antenas comerciales que se usan para sistemas GNSS.

1.3 Organización de la memoria

La memoria del TFG consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: es la introducción, donde se explica en que va a consistir el TFG, los objetivos marcados para el diseño final y como se organiza la memoria.
- Capítulo 2: este capítulo trata sobre el estado del arte. En él se hace una introducción a los sistemas GNSS, contando cuales son los que están implementados en la actualidad, así como los que están siendo desarrollados. También se explican los conceptos más importantes para la correcta comprensión de dicho TFG. Para finalizar se enumeran los tipos de antena más usados por sus características en sistemas GNSS, pasando por las redes de alimentación más utilizadas.
- Capítulo 3: en este capítulo se muestran las antenas comerciales que existen ahora mismo en el mercado contando sus principales características, las cuales están resumidas en una tabla y también se explica cuáles han sido los puntos tenidos en cuenta para la realización del diseño final de la antena del TFG.
- Capítulo 4: se explica todo el proceso de mejora de la antena a partir de la antena realizada por Adrián y María, indicando que se obtiene en cada apartado. Se explica porque se ha elegido el diseño de la red de alimentación y como se ha diseñado paso a paso. También se muestran las simulaciones y resultados de cada paso realizado para la obtención del diseño final.
- Capítulo 5: se une el elemento radiante con la red de alimentación y se simula para obtener los resultados finales y así poder ver si se han conseguido los requisitos fijados para el TFG.
- Capítulo 6: se sacan las conclusiones del TFG a partir de todo lo hablado anteriormente, se dice si se han conseguido los objetivos fijados y se proponen las líneas futuras de estudio sobre el campo en el que se ha trabajado y sobre la antena.

2 Estado del arte

En esta sección se discuten los aspectos iniciales a tener en cuenta para la posterior explicación del TFG. Se va a empezar hablando sobre que son los sistemas GNSS contando sus aplicaciones más destacadas tanto militares como civiles y enumerando los tipos de sistemas que existen en la actualidad. A continuación, se describen los tipos de antenas más utilizadas para sistemas GNSS, así como los tipos de redes de alimentación existentes en el mercado. Por último, se cuentan algunos conceptos teóricos importantes para la comprensión de las características y resultados discutidos dentro del TFG.

2.1 Alcance de la tecnología

En primer lugar, se va a hacer una introducción a los sistemas GNSS que son los sistemas sobre los que se va a trabajar. Después de tener claro cómo funcionan estos sistemas, se pasa a la explicación de las aplicaciones y de los distintos tipos que existen

Se entiende por GNSS (Global Navigation Satellite Systems) a sistemas pasivos de navegación basado en satélites emisores de radiofrecuencias, que proporcionan un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independiente de las condiciones atmosféricas, de forma continua en cualquier lugar de la Tierra, y disponible para cualquier número de usuarios [3].

2.1.1 Aplicaciones

Las aplicaciones de los sistemas de antena de referencia para navegación por satélite, y más específicamente para los sistemas de GNSS, se pueden dividir en dos tipos de aplicaciones primero las militares que es donde tienen su origen y luego las aplicaciones civiles que empezaron a funcionar a finales de los años 80 [4].

2.1.1.1 Aplicaciones militares

Las aplicaciones militares son muy diversas dependiendo del tipo del ejercito al que vayan destinadas. Se pueden tener las siguientes:

- **Ejército del aire:** automatización de rutas, reconocimiento y localización de objetos, precisión al fijar un objetivo... [4]
- **Marina:** saber la posición de los submarinos, orientación en el mar, operaciones anfibias... [4]
- **Ejército de tierra (Infantería):** puntos de encuentro, localización de rutas, diseño de estrategias, supervivencia... [4]

2.1.1.2 Aplicaciones civiles

Las aplicaciones civiles surgen a partir de finales de los 80, y supone el inicio de un nuevo campo con numerosas aplicaciones. A continuación, se nombran algunas de las más importantes:

- **Automoción:** los sistemas de navegación basados en GPS; trazan rutas desde un punto origen hasta un punto destino informándote como llegar, teniendo en cuenta el tráfico, la mejor ruta, radares... Otra aplicación en automoción en la actualidad serían los coches sin conductor. Necesarios los sistemas GNSS para que el coche pueda ir de un lugar a otro [4].

- **Agricultura:** los sistemas GNSS han facilitado los procesos agrícolas y han ayudado a la automatización de sistemas agrícolas de gran escala y precisión [4].
- **Ferrocarriles:** se utiliza para ayudar al control del tráfico y para conocer la posición de los trenes [4].
- **Transporte multimodal:** permiten una coordinación más rápida entre los distintos tipos de transporte necesarios para mover algunas mercancías, ya que se sabe en todo momento su posición [4].
- **Aviación:** los sistemas GNSS sirven para trazar las rutas y para la utilización del piloto automático [4].
- **Servicios de localización de emergencia:** basados en el GPS de los teléfonos móviles, wearables, relojes... que envían información sobre la posición en caso de emergencia [4].
- **Navegación marítima:** los sistemas GNSS son utilizados en la mayoría de los barcos para la navegación en mares o ríos, así como para informar de su posición cuando sea necesario [4].
- **Telefonía móvil:** todos los teléfonos móviles tienen integrado un GPS para conocer donde se encuentra el dispositivo, así como para el uso en distintas aplicaciones dentro del teléfono [4].
- **Diseño de mapas:** se utiliza para la medición de datos y para la actualización de mapas [4].

A continuación, se va a hablar sobre los distintos sistemas de posicionamiento que se encuentran implementados alrededor del mundo, se puede diferenciar entre sistemas GNSS y sistemas de aumento y dentro de estos dos tipos se pueden destacar:

Los sistemas GNSS que ya están siendo utilizados como pueden ser GPS o GLONASS y los que están en proceso o desarrollándose como podrían ser Galileo o COMPASS.

- **Sistemas GNSS:** En este grupo están los sistemas GPS y GLONASS que son sistemas que ya están implementados y están siendo utilizados para diversas aplicaciones.
 - **Sistema GPS:** Es un sistema perteneciente a Estados Unidos, consta de 24 satélites que se mueven en órbitas cuasi-circulares a 26.500 km, alrededor de seis planos con una inclinación de 55 grados.
Éste es un sistema de radionavegación basado en satélites que utiliza mediciones de distancia precisas de satélites GPS para determinar la posición y la hora [5].
 - **Sistema GNOLASS:** Como alternativa al sistema GPS encontramos GNOLASS un sistema perteneciente a Rusia, consta de 24 satélites que se mueven en órbitas elípticas muy excéntricas a 25.508 km, alrededor de tres planos con una inclinación de 64.8 grados.
Es un sistema basado en las mediciones del tiempo de tránsito y de desviación Doppler de las señales de radio frecuencia transmitidas por los satélites GLONASS [5].
- **Sistemas en proceso:** En este grupo están los sistemas Galileo y COMPASS que son sistemas que están siendo desarrollados para poder ser implantados y sustituir al sistema GPS.

- Sistema Galileo: Sistema de posicionamiento que está desarrollando la Unión Europea como alternativa al sistema GPS de Estados Unidos, para así eliminar la dependencia que se tiene respecto a dicho sistema. Además de esto quiere reducir el error y tener una mayor precisión.
Este sistema consta de 30 satélites que se mueven en órbita a 29.601 km, alrededor de tres planos con una inclinación de 56 grados [1, 2, 4, 5].
- Sistema COMPASS: Sistema de posicionamiento que está siendo desarrollado por China y que tiene como objetivo ofrecer un servicio independiente del sistema GPS estadounidense a las personas chinas. En sus inicios se llamaba Beidou.
Este sistema consta de 35 satélites que se mueven en la órbita MEO y GEO, con una inclinación de 55 grados [2, 5, 6].

En la tabla que está a continuación se puede observar las características de cada uno de los diferentes sistemas GNSS sobre los que se ha hablado y en la figura posterior a dicha tabla se ve la banda de frecuencias para estos sistemas.

Tabla 2-1: Detalles sobre el GNSS actual [5]

GNSS	Modernized GPS	GLONASS	Galileo	Compass
<i>Number of SVs</i>	24	24	30	35
<i>Orbits</i>	6	3	3	?
<i>Orbit radius (km)</i>	26.560	25.508	29.601	MEO/GEO/IGSO
<i>Orbit time</i>	11h, 57.96 min	11h, 15.73 min	14h, 4.75 min	?
<i>Inclination</i>	55°	64.8°	56°	55° (MEO)
<i>Carrier frequency (GHz)</i>	L1: 1.5754 L2: 1.2276 L3: 1.176	G1: 1.602.000 Increment (MHz):0.5625; G2:1.246.000 Increment (MHz):0.4375; G3:1.204.704 Increment (MHz):0.4230	E1: 1.575 E5a: 1.176 E5b: 1.207 E6: 1.278	B1: 1.5611 B1-2: 1.5897 B3: 1.2685 B2: 1.2071
<i>Modulation</i>	BPSK, BOC	BPSK	BPSK,BOC	QPSK(2), QPSK(10), BPSK(10)+BPSK(2)

MEO = ; IGSO = ; BPSK = binary phase shift keying; QPSK = quadrature phase shift keying; BOC = binary offset carrier.

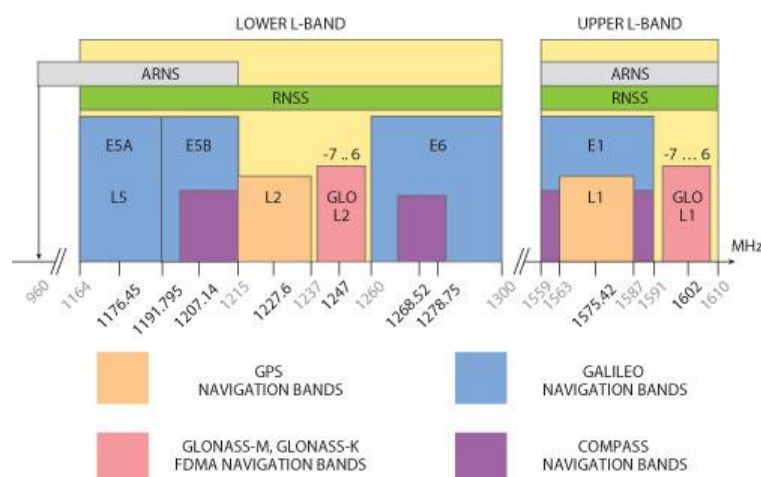


Figura 2-1: Banda de frecuencias de GNSS [7]

No es adecuado ni seguro depender exclusivamente de los sistemas GNSS para proporcionar información de posición precisa necesaria durante determinadas misiones críticas, como durante las operaciones de vuelo en la aviación civil, operaciones marítimas como el acceso y entrada al puerto o la navegación a través de vías de aguas estrechas. Aquí es donde es necesario el uso de los sistemas de aumento cuya función es mejorar la precisión, la integridad y la disponibilidad de las señales GNSS básicas durante las misiones críticas. Los sistemas de aumento incluyen una red de tierra para monitorear los satélites de los GNSS y los satélites geoestacionarios para transmitir correcciones y datos de integridad al usuario final [5].

Los sistemas de aumento se componen de una serie de estaciones de referencia, estaciones maestras, estaciones de enlace ascendente y satélites geoestacionarios. Las estaciones de referencia que están geográficamente distribuidas recogen los datos del satélite GNSS y lo dirigen a las estaciones maestras donde se generan correcciones de área amplia; estas correcciones se envían a las estaciones de enlace ascendente que las enlazan con los satélites geoestacionarios para su retransmisión en la frecuencia L1 de GPS. Estos satélites geoestacionarios transmiten las señales que llevan mensajes de precisión e integridad, de modo que estén disponibles para los usuarios que se extienden en un área amplia [5].

Los principales sistemas de aumento que se han desarrollado sobre todo para apoyar la navegación aérea en ruta son:

- WAAS (Wide Area Augmentation System), cuyo patrocinador público es la Administración Federal de Aviación de EE. UU. [5]
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), que ha sido desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) [5].
- MSAS (Multifunctional Satellite-Based Augmentation System), que depende de Japón [5].
- GAGAN (GPS and Geoaugmented Navigation), con el respaldo de la India [5].

Estos cuatro sistemas combinados proporcionan un servicio de sistemas de aumento casi mundial [5].

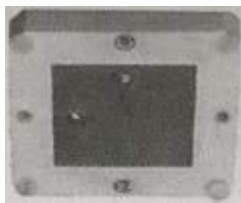
2.2 Tipos de elementos

2.2.1 Tipos antenas

Para los sistemas GNSS hay algunos tipos de antenas que son más utilizados, ya que son mejores debido a sus prestaciones y tipo de diagrama de radiación. Ahora se van a enumerar las más importantes y se va a dar una explicación de los aspectos y las características más destacadas. Para finalizar se explicará la antena elegida para este TFG y sus ventajas respecto a las demás.

- **Antenas Microstrip:** son el tipo de antenas GNSS más populares, son usadas en una gran variedad de sistemas civiles y militares. Su perfil muy bajo, su tamaño compacto, su capacidad a adaptar su forma a la superficie del elemento donde se va a colocar, su facilidad para obtener polarización circular a derechas (RHCP) y la fabricación de bajo coste le otorgan ventajas únicas que son difíciles de combinar para aplicaciones de GNSS con cualquier otra antena.
Su principal uso es en aviación, ya que por su bajo perfil y por lo que se pueden compactar les permiten cumplir fácilmente los requisitos de tamaño [5].
- **Antena Quadrifilar Helix:** este tipo de antenas es popular para muchas aplicaciones GNSS y es especialmente adecuado para su uso en receptores de mano y terminales móviles. Es una matriz de cuatro elementos de antena resonante con forma helicoidal envueltos alrededor de un cilindro en el ángulo de paso deseado y conducidos en cuadratura de fase para producir un haz amplio de polarización circular a derechas (RHCP). Su tamaño se puede controlar mediante el uso de sustratos eléctricos y se pueden hacer versiones impresas para reducir el coste [5].
- **Antena Hexafilar Slot:** esta antena consta de seis ranuras resonantes de longitud lambda cuartos, cada una de las cuales se enrolla media vuelta alrededor de un laminado cilíndrico. Las antenas de ranura mantienen la relación de fase requerida entre sí necesaria para proporcionar una polarización circular a derechas (RHCP) con cobertura casi hemisférica. Los resultados experimentales indican que a 3 dB proporcionan una buena resistencia a las señales multitrayecto desde el suelo [5].
- **Antenas Giratorias Plana y Caída:** las antenas de lazo son versiones planas de la antena bicónica, que es conocida por sus propiedades de banda ancha. El RHCP necesario para GNSS se puede obtener a partir de un par de dipolos cruzados colocados en el plano x-y sobre un plano de masa y alimentado con amplitudes iguales en cuadratura de fase, con fases de 0° y -90° , respectivamente [5].
- **Antenas Direccionales:** los diseños de los tres tipos de antenas direccionales usados en aplicaciones de GNSS son: helicoidal, espiral cónica y reflector parabólico.
 - Los dos tipos de antenas helicoidales polarizadas circularmente utilizadas en sistemas GNSS son:
 - Antena helicoidal de modo axial cilíndrico con amplio ancho de banda y ganancia relativamente alta en la dirección de apuntamiento [5].
 - Antena hemisférica de hélice de perfil bajo con un haz amplio de CP para proporcionar cobertura en una parte más grande del hemisferio superior similar a una FRPA, la cual tiene una ganancia menor que una helicoidal [5].

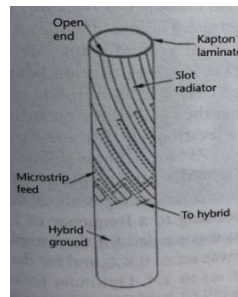
- Las antenas formadas por reflectores que proporcionan una ganancia muy alta se utilizan cada vez más, tanto en Estados Unidos como en Europa, para controlar la calidad y la pureza espectral de las señales emitidas por los satélites de reciente lanzamiento. Estas antenas también se utilizan para identificar la interferencia de señal y para caracterizar posibles anomalías de señal y errores causados por el hardware del satélite [5].
- **Antenas de array:** un array de antenas puede dirigir cuatro o más haces múltiples de alta ganancia hacia los satélites GNSS para recibir solo señales de interés mientras simultáneamente mitiga las señales que no son de interés debido al multitrayecto o a las interferencias; es capaz de diferenciar entre estos dos tipos de señales utilizando su separación espacial. Los arrays de antenas de formación de haces digitales se utilizan con frecuencia en comunicaciones inalámbricas para mejorar la calidad de la señal [5].



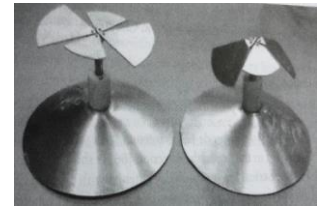
(a)-Antena microstrip [5]



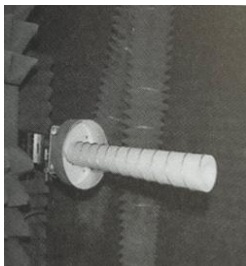
(b)-Antena Quadrifilar Helix [5]



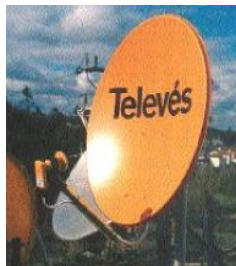
(c)-Antena Hexafilar Slot [5]



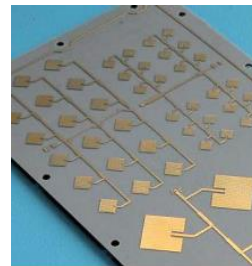
(d)-Antenas Giratorias Plana y Caídas [5]



(e)-Antena Direccional [5]



(f)-Antena Direccional con reflector [8]



(g)-Antena de array de parches [8]

Figura 2-2: Tipos de antenas

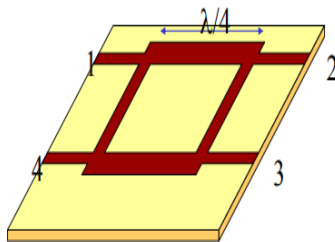
2.2.2 Tipos redes alimentación

A continuación, se van a explicar los distintos componentes utilizados en la formación de redes de alimentación que existen y cuáles son los mejores para utilizarlos con antenas para sistemas de GNSS. Finalmente se explicará porque se ha elegido esa red de alimentación para implementar en este TFG.

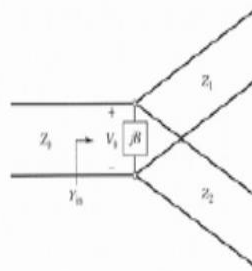
- **Branchline:** son circuitos de 4 puertas como se puede observar en la figura 2-3a, y que permiten obtener un desfase de 90 grados entre dos de dichas puertas. Esa

diferencia de fase permanece más o menos constante en frecuencia, dependiendo del número de anillos que lo conforman [9].

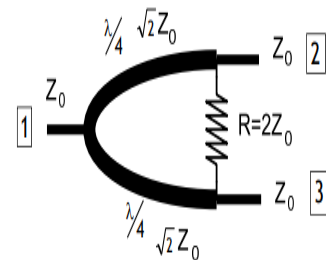
- **Divisor en T:** es un divisor que debido a su construcción sencilla y sin pérdidas, como se puede apreciar en la figura 2-3b, no se consigue adaptar en sus tres puertos a la vez. Este tipo de red tiene como ventaja que es muy fácil de construir y de medir [10, 11].
- **Divisor Wilkinson:** Es un divisor en T, pero al que para conseguir que estén adaptados todos los puertos, se le añade según se ve en la figura 2-3c, una resistencia. La potencia que entra se reparte igual por las dos salidas [10, 11].
- **Matriz de Butler:** es una red que consiste en 2^n entradas, 2^n salidas, $2^{-1} * (\log_2(2))^n$ acopladores híbridos, saltos de pista y desfases. Para una configuración plana con una sola capa, existen varios cruces de pista, en los que es importante un gran aislamiento entre puertas, al igual que la linealidad de los elementos. Una matriz de Butler recoge o emite las señales de un array de antenas, y les aplica un cambio de fase, de tal manera que produce 2 elevado a n haces con una separación angular constante [12].
- **Línea Microstrip:** suele ser mediante una línea coplanar. Éste es un método de alimentación muy simple, permite controlar la impedancia de entrada y el material y sustrato es igual para la línea y para la antena. También puede producir acoplo y radiación espuria entre la línea y la antena [13, 14].
- **Sonda coaxial:** permite controlar la impedancia de entrada y eliminar la radiación espuria, pero es difícil de adaptar con sustratos gruesos y tiene un ancho de banda limitado. Este método necesita de soldadura [13, 14].



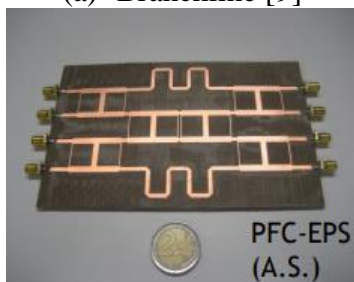
(a)- Branchline [9]



(b)- Divisor en T [10]



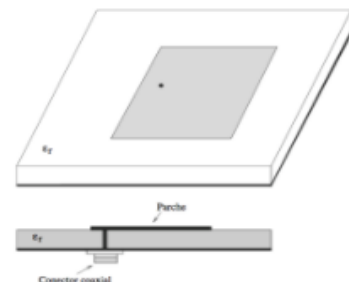
(c)- Divisor Wilkinson [9]



(d)- Matriz de Butler [9]



(e)- Línea Microstrip [13]



(f)- Sonda coaxial [13]

Figura 2-3: Tipos redes de alimentación

2.3 Marco Teórico

Hace unos años era inimaginable que los sistemas de navegación podían llegar a ser tan importantes como han llegado a ser en la actualidad. En un principio antes de utilizar dichos sistemas se utilizaban mapas, brújulas... para la orientación y conexión entre dos puntos, pero esto gracias a los sistemas GNSS ha cambiado, ya que facilitan la vida del usuario. Además, con el gran aumento de la tecnología cada vez es más necesario su uso para ciertas

aplicaciones como pueden ser coches, robots, etc. Todo este aumento en las aplicaciones hace que se estén mejorando y perfeccionando (GPS, GLONASS), así como surgiendo nuevos sistemas en diferentes partes del mundo (Galileo, COMPASS) para así ofrecer un mejor servicio.

Por todo este aumento, en este TFG se desarrolla una antena de referencia para mejorar algunos aspectos importantes dentro de los sistemas de posicionamiento como pueden ser la estabilidad del centro de fase, la relación axial o la respuesta de los parámetros S. Este TFG se realiza como continuación de los TFGs de Adrián Pérez Quintana y María Pablo Fernández, donde se consigue mejorar mediante la optimización del elemento radiante y la implementación de una red de alimentación, la respuesta de los parámetros S11, así como la relación axial. Al conseguir una mejora en el parámetro S11 se puede ver como también existe una mejora significativa en el centro de fase.

Por esto y para la correcta comprensión del TFG, se muestran a continuación y en el estado del arte algunos conceptos teóricos importantes en el ámbito de las antenas.

2.3.1 Definición de antena

Dispositivo “metálico” que emite y/o recibe ondas de radio electromagnéticas, que también adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor al medio [8, 2].

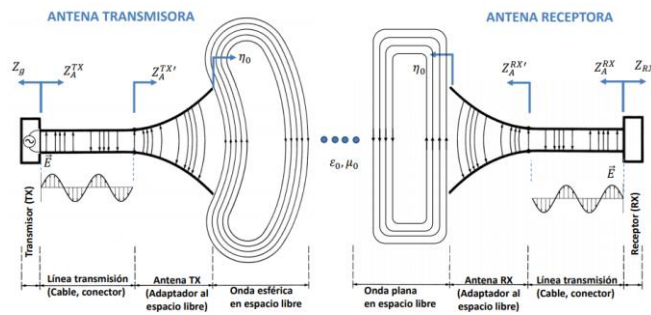


Figura 2-4: Antena [8]

3 Diseño

3.1 Diseños actuales

En este capítulo se va a explicar cuáles son los diseños actuales de antenas más utilizados para sistemas GNSS. Se contará los distintos tipos que hay dependiendo de sus características, proveedores... y se detallará las especificaciones de cada uno de los tipos para así al final hacer una comparativa de todas ellas.

Cada una de las antenas explicadas a continuación pertenecen a los proveedores comerciales más importantes en el ámbito de los sistemas de posicionamiento. Entre ellos se puede destacar Exelis, Leica, Novatel y Thales.

3.1.1 Exelis DM C146 Series GPS Antenna

Las series de antenas DM C146 proporcionan recepción GPS en L1 y L2, y son adecuadas para una amplia variedad de instalaciones.

La antena DM C146 ha sido diseñado con elementos radiantes de banda ancha y una red de alimentación en cuadratura. El elemento de banda ancha permite que la serie DM C146 proporcione una cobertura continua desde las frecuencias L2 a L1 sin tener en cuenta la temperatura de funcionamiento. La red de alimentación en cuadratura, además de ofrecer una excelente polarización circular y una relación axial mínima, proporciona una onda de baja fase, una simetría de patrón excelente y un centro de fase estable.

Las antenas GPS de la serie DM C146 están disponibles en muchos modelos diferentes para adaptarse a aplicaciones aéreas, marinas y terrestres.

Estas antenas son de bajo perfil y se instalan fácilmente. También está disponible el modelo U305-1, que incluye un anillo de chokes. Este modelo con el uso del anillo mitiga los efectos de la interferencia multitrayecto [15].

3.1.2 Leica AR25 Choke Ring Antenna

La antena de anillo de chokes Leica AR25 con su diseño de chokes 3D es de alta calidad; es una antena de alto rendimiento diseñada para todas las aplicaciones geodésicas, incluida la red RTK, y es especialmente adecuada para aplicaciones científicas que requieren un seguimiento de baja elevación prolongada.

La antena AR25 ofrece un diseño 3D único que permite un excelente seguimiento a baja altura y la integridad de los datos, mientras que al mismo tiempo mantiene un muy buen rechazo de múltiples trayectorias y un posicionamiento de alta precisión; lo que lo hace adecuado para todas las aplicaciones de la red RTK y científicas que exigen el mayor rendimiento de seguimiento [16].

3.1.3 Leica AR20 Choke Ring Antenna

La antena de anillo de chokes Leica AR20 es un nuevo diseño que toma las fortalezas del diseño AR25 3D en una nueva forma más rentable. El AR20 contiene un nuevo diseño de anillo de chokes 3D que brinda un mejor rendimiento multitrayecto en todas las bandas de frecuencia de los GNSS, una estabilidad mejorada del centro de fase y una excelente integridad de los datos.

El efecto combinado de todas estas características da como resultado una antena con la mejor precisión de posicionamiento. Es una de las mejores opciones para la mayoría de las aplicaciones, incluida la red RTK y la monitorización [16].

3.1.4 Leica AR10 Integrated Antenna

El AR10 es una antena geodésica de alto rendimiento para una amplia gama de estaciones de referencia permanentes o semipermanentes y aplicaciones de monitoreo que requieren calidad de datos de antenas de anillo de chokes sin el tamaño ni peso del anillo de chokes tradicional. El AR10 tiene un radomo cónico integrado robusto y resistente a los rayos UV.

El AR10 brinda un nivel de anillo de chokes cercano en una antena de plástico liviana y muy robusta con cúpula cónica integrada, por lo que es adecuada para todas las estaciones de referencia y aplicaciones de monitoreo como se ha comentado anteriormente [16].

3.1.5 Novatel GNSS-750

La antena GNSS-750 de Novatel ofrece tecnología de anillos de chokes de última generación, garantizando la funcionalidad con las constelaciones de satélites existentes y planificadas. Su robusta construcción de perfil bajo lo hace ideal para estaciones de referencia, monitoreo geológico y otras aplicaciones que requieren una antena de alto rendimiento.

El diseño de esta antena 3D mejora el seguimiento de baja elevación.

Utilizando un elemento de antena Dorne-Margolin de banda ultra ancha, el GNSS-750 optimiza la ganancia de la antena, permitiendo el uso con la mayoría de los receptores geodésicos de los fabricantes. La robusta construcción de aleación de aluminio asegura que puede soportar las condiciones ambientales más difíciles.

Algunas de sus prestaciones más destacadas son: realiza mediciones de alta precisión, un mayor número de observaciones de señales aseguran un mayor rendimiento, soporta entornos hostiles y tiene un centro de fase estable [17].

3.1.6 Novatel GPS-701-GG

El GPS-701-GG usa la frecuencia L1, mientras que el GPS-702-GG usa las frecuencias L1 y L2. Ambas antenas ofrecen recepción de señal GPS + GLONASS combinada. La antena se puede usar tanto para aplicaciones de constelación dual como solo GPS, lo que resulta en una mayor flexibilidad y costos reducidos de los equipos.

El centro de fase de estas dos antenas permanece constante a medida que cambia el acimut y el ángulo de elevación de los satélites. La recepción de la señal no se ve afectada por la rotación de la antena o la elevación del satélite, por lo que la colocación e instalación de las antenas se puede completar con facilidad. Estas antenas son ideales para líneas de base de cualquier longitud.

Las prestaciones más importantes de esta antena son: buen rendimiento de la antena de anillo de chokes sin tamaño ni peso, hay una reducción en los costes del equipo, flexibilidad de colocación y posicionamiento de precisión, elimina la necesidad de un rediseño futuro y tiene un excelente rechazo multitrayecto [18].

3.1.7 Thales Choke Ring Antenna

La antena de anillo de chokes Thales conserva el diseño original del servicio GPS internacional y, por lo tanto, es totalmente compatible con los requisitos para las estaciones permanentes IGS. El anillo de chokes se mecaniza a partir de una sola barra de aluminio. El anillo de chokes incluye un elemento dipolar vertical Dorne & Margolin C146-10. La antena de anillo de chokes proporciona tecnología y confiabilidad demostradas y es el estándar para aplicaciones de referencia de alta gama.

El anillo de chokes Thales es un diseño probado y se utiliza en docenas de redes de gama alta de todo el mundo, entre estas redes se incluyen el IGS, la red GPS integrada del sur de California, el departamento de artillería en el Reino Unido y el departamento sismológico de China. La antena consiste en una placa de tierra con cinco estructuras de anillos concéntricos, un elemento dipolo C146-10 Dorne & Margolin y un amplificador de bajo ruido propio, el diseño del anillo de chokes atenúa significativamente la propagación multidireccional al atenuar las señales GPS reflejadas, mejorando así la calidad del GPS observable [19].

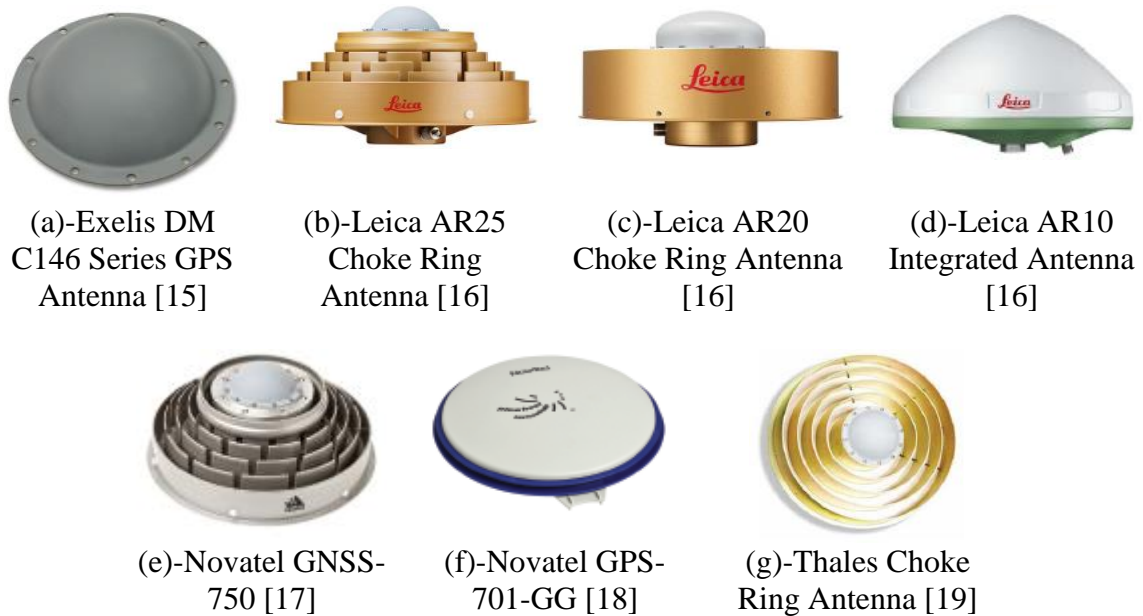


Figura 3-1: Antenas comerciales actuales

Tabla 3-1: Comparativa [1] de las antenas comerciales de Thales [19], Leica [16], NovAtel [17], Trimble y Exelis [15]

Parámetros	Thales	Leika	NovAtel	Trimble	Exelis
Bandas de frecuencias	GPS: L1, L2	GPS: L1, L2, L5 GLONASS: E2-L1 E1, E5a, E5b, E5a+b (AltBOC), E6 QZSS: L1, L1C, L2C, L5, L1-SAIF, LEX	GPS: L1, L2, L2C, L5 GNOLASS: L1, L2, L3 Galileo: E1, E5a, E5b, E6, AltBOC BeiDou: B1, B2, B3 L-Band	GPS: L1, L2, L5 GNOLASS: G1, G2, G3 Galileo: E1, E2, E5ab, E6 COMPASS	GPS: L1, L2

Parámetros	Thales	Leika	NovAtel	Trimble	Exelis
		BeiDou: B1, B2, B3 Banda L: SBAS, Omni STAR, Veri pos, CDSGPS			
Elemento radiante	Dorne & Margolin C146-10	Dorne & Margolin GPS, GLONASS, Galileo BeiDou, elemento de antena QZSS	Dorne & Margolin C146-10	Dorne & Margolin AIL C-146	-
Tensión de alimentación CC (V)	5 – 15	3.3 - 12	3.3 - 12	3.5 – 20	-
Corriente de alimentación (mA)	45 (típica)	100 (máximo)	100 (típica)	125 (máximo)	-
Polarización	RHCP	Según el elemento radiante	RHCP	RHCP	RHCP
Ganancia total con LNA (dB)	L1: 38±3 L2: 39±3	40	41±3	50±2	-
Ganancia en el zenith (dBiC)	5	Según el elemento radiante	5	5	5
VSWR	1.5:1	Según el elemento radiante	1.5:1	2:1	1.5:1
Estabilidad en el centro de fase (mm)	-	< 1	< 2	< 2	-
Conector	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)
Temperatura de operación (°C)	-55 a 65	-55 a 85	-55 a 85	-55 a 85	-
Temperatura de almacenamiento (°C)	-55 a 75	-55 a 90	-55 a 90	-55 a 85	-
Protección ante humedad	100%	100%	100%	100%	100 %
Dimensiones (mm)	127 altura	Φ 380 x 200 altura	Φ 380 x 200 altura	Φ 380 x 140 altura	-
Peso (kg)	4.7	8.1	7.6	4.3	0.23

3.2 Propuesta de diseño

En la siguiente imagen se puede observar cómo queda el diseño final de la antenna realizada en el TFG.

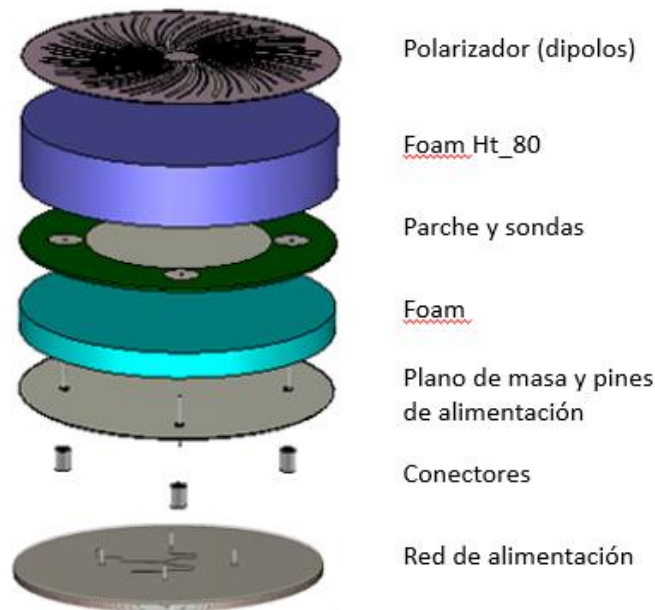


Figura 3-2: Componentes bajo estudio

A continuación, se va a describir brevemente para que se usa cada parte y en el capítulo 4 se termina de explicar el diseño completo.

- Polarizador (dipolos): Con el polarizador se consigue una mejor adaptación, así como un mayor ancho de banda, y también aumenta el rango de validez de la relación axial.
- Foam: Es el material dieléctrico. Con la estructura implementada y su espesor, se aumenta el ancho de banda.
- Parche y sondas: Se alimenta n las corrientes que generan el campo con el parche central a través de las sondas.
- Plano de masa
- Red de alimentación: Se alimenta el elemento radiante y se dota de polarización circular a derechas.

En este apartado se van a describir los puntos que se han tenido en cuenta para el diseño y mejora de la antena tratada en este TFG. A partir de la antena diseñada por Adrián y María con los puntos expuestos a continuación, se consigue optimizar, así como mejorar dicha antena a través de la parametrización y el diseño de la red de alimentación.

- Se ha diseñado una antena que comprenda todas las frecuencias disponibles en los sistemas GNSS que van desde 1.2 hasta 1.6 GHz, cuya frecuencia central es 1.4 GHz.
- A partir del diseño de la antena de referencia de María Pablo, parametrizando; se ha pasado a mejorar el ancho de banda y la adaptación en la banda requerida por el sistema, cambiando la longitud y el diseño de los dipolos. Con esto también se consigue mejorar la relación axial.

- Posteriormente, mediante la parametrización y la realización de distintas pruebas se ha intentado obtener un centro de fase más compacto y estable, ya que al mejorar el centro de fase se consigue mejorar la precisión de la posición en los sistemas GNSS.
- Después de conseguir mejorar los aspectos discutidos en el punto anterior se ha planteado la implementación de una cavidad alrededor de la antena, para eliminar las corrientes y bajar el parámetro S21 cuando se coloca el elemento como parte de un array.
- Paralelamente se ha implementado una red de alimentación con rotación secuencial en cuatro puertos, para así mantener una polarización circular a derechas en la antena de referencia anteriormente descrita. A su vez, se consigue una red de alimentación de banda ancha.
- Para finalizar y dentro de líneas futuras se ha estudiado añadir distintos tipos de stub para así conseguir un mayor ancho de banda. Además de esto, también se ha propuesto el diseño de un array de antenas.

Después de una introducción sobre los puntos más importantes a tratar en el desarrollo del TFG, se pasa a explicar más detalladamente el diseño y los pasos seguidos para la obtención final del elemento radiante con su red de alimentación.

4 Desarrollo

Dentro de este capítulo se van a ir explicando porque se ha seleccionado cada uno de los componentes que forman parte del diseño final, así como los pasos seguidos para su diseño y su posterior unión.

Tras haber explicado dicha elección de componentes, se pasa a mostrar y a comentar los resultados obtenidos en cada paso previo hasta la obtención del diseño final, unión entre el elemento radiante y la red de alimentación.

4.1 Selección de diseño

Para empezar la realización de este TFG primero se hizo un estudio de las distintas posibilidades que existían teniendo en cuenta los requisitos que se necesitan para el diseño de la antena.

En el trabajo anterior del TFG presentado en [2] se puede ver el estudio detallado de todos los elementos candidatos para el diseño final. Para realizar dicho estudio se consideraron las características y prestaciones más importantes a tener en cuenta para el diseño que se va a realizar.

Para seleccionar el elemento radiante se ha mirado la polarización, la banda de frecuencia y centro de fase. Una vez decidido que elemento radiante se va a utilizar se pasa a estudiar que red de alimentación es la que más conviene al diseño.

Tras el estudio se decidió partir de la red de alimentación explicada en [20] y una vez obtenido esto, se formula una estrategia para su optimización y se hicieron los cambios necesarios para conseguir la red del diseño final, que actualmente soporta un 20% de la banda total de requisito.

En los siguientes capítulos se explica el diseño de cada uno de los componentes por separado contando las técnicas utilizadas, los materiales, las dimensiones, etc.

4.2 Elemento radiante

Tras el estudio realizado en [2] entre todos los posibles candidatos a ser el elemento radiante gracias a las características que presentan, se ha decidido elegir el parche circular ya que cumple mejor las especificaciones requeridas.

Este elemento tiene un ancho de banda que cumple con el necesario para cubrir todas las frecuencias de los sistemas GNSS, polarización circular que es una característica totalmente necesaria dentro del diseño y un centro de fase estable. El ancho de banda producido por este parche es del 36.25%.

Ahora se van a describir cada una de las partes de la antena por separado.

- Parche: se ha diseñado un parche circular simple que se encuentra entre un componente de material Foam y otro formado por FR4.

- Dipolos: se han diseñado unos dipolos que se encuentran situados en un componente de material FR4 y que actúan como polarizador para conseguir una mejor respuesta final en el diseño.
- Cavidad: finalmente se ha construido una cavidad que rodea todo el elemento radiante para así conseguir eliminar las corrientes producidas por elementos próximos.

4.3 Red de alimentación

En este TFG se implementa una red de alimentación para alimentar el elemento radiante a través de los puertos coaxiales y así dotarle de una polarización circular a derechas con un gran ancho de banda.

Antes de elegir esta red de alimentación al igual que con la elección del elemento radiante se hizo un estudio previo, pero por las características requeridas de diseño se elige una red de alimentación con un híbrido (Branchline) y dos divisores.

La red de alimentación está dividida en capas para así conseguir ajustarla a las medidas de la antena. Se va a empezar a describir las capas de abajo, donde se encuentra un plano de masa hasta llegar a arriba donde se conecta a los conectores SMA de la antena.

Se comienza la red de alimentación poniendo un plano de masa seguido de un dieléctrico, con esto se llega a la primera capa donde se encuentra el Branchline, con el cual se van a desfazar los 90° necesarios para así dotar de una polarización circular a derechas. A dos de las ramas de dicho elemento se les pone una vía que se une con las entradas de los divisores y las otras dos ramas las conectamos a dos conectores SMA una con una carga de 50 ohm y otra para alimentar la antena. Después de esta capa se coloca el dieléctrico de Taconic RF-35, un plano de masa y otra capa de dieléctrico. Tras esto viene la capa donde va colocado uno de los divisores; en la entrada del divisor hay una vía que conecta con una de las ramas del Branchline y a las salidas del divisor se conectan unas vías que posteriormente se unirán al elemento radiante. A continuación, se repite la secuencia dieléctrico-plano de masa-dieléctrico y por último está la capa con el segundo divisor unido por la salida al Branchline y por las entradas a los puertos restantes del elemento radiante. Para cerrar este diseño se coloca un dieléctrico seguido de un plano de masa.

4.4 Diseño de componentes

El diseño de la antena de referencia seleccionado se puede dividir en cuatro partes que son: la red de alimentación que consta del Branchline y de dos divisores como se ha comentado anteriormente, la segunda parte consta del elemento radiante que en este caso es un parche circular, la tercera parte está formada por el polarizador (dipolos), y la última parte, se ha implementado una cavidad con la que eliminar las corrientes de acoplo dentro de un array.

Como se ha podido ver anteriormente, previo a la implementación del diseño se ha hecho un estudio viendo cuáles son los elementos óptimos para las funciones y requerimientos que se están buscando. Una vez visto este apartado se tendrá una idea general de cómo ha sido el proceso de diseño de los componentes y las características obtenidas gracias a ello.

4.4.1 Parche activo simple

Este componente fue diseñado por María Pablo [2] en el TFG previo a este. Para conseguir dicho diseño se hizo un estudio de los distintos elementos radiantes del mercado y tras

observar las distintas características y prestaciones, se decidió elegir el parche circular debido a que cumplía todas las necesarias para el diseño.

Una vez elegido este parche se pasa a la implementación. Para implementarlo se calculan las dimensiones a partir de las fórmulas que se puede ver a continuación. Finalmente, una vez obtenida las dimensiones del parche se pasa a buscar la separación óptima entre dicho elemento y el plano de masa.

$$f_{c,mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\gamma_{mn}}{a_{efec}} \quad [2]$$

$$a_{efec} = a \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{a_{efec}} \right) + 1.7726 \right]} \quad [2]$$

4.4.2 Parche apilado

Como ocurre con el componente anteriormente citado, este también ha sido implementado por María [2]. Con este parche se pretende mejorar el ancho de banda, jugando con las dimensiones del mismo, así como con la distancia entre el parche activo simple y dicho parche apilado.

4.4.3 Polarizador

A continuación de los dos parches ya citados, se pasa al diseño de unos dipolos parásitos colocados encima de un parche que actúan como polarizador y consiguen mejorar las prestaciones.

Este parche con sus respectivos dipolos han sido mejorados a partir del diseño inicial de María [2]. En un diseño inicial dichos dipolos conseguían aumentar el ancho de banda respecto al diseño sin ellos, para ello se organizaban de forma concéntrica como se puede observar en la figura 4-1. Una vez diseñada la antena añadiendo el parche con los dipolos se pasa a la realización de algunas pruebas para modificar y optimizar la forma y el tamaño de los dipolos y así conseguir una respuesta óptima. Tras hacer distintas pruebas se consigue la mejor respuesta con dipolos de distintas alturas y longitudes concéntricos al eje de coordenadas.

Después de obtener este resultado en el TFG de María, se pasa a hacer un segundo estudio en este TFG para conseguir mejorar la respuesta con la que ya se trabajaba. Para esto, se utiliza una técnica que consigue darle curvatura a la parte de los dipolos más cercana al centro; con esto y variando la longitud e inclinación de los dipolos se consigue obtener una mejor respuesta y con un mayor ancho de banda.

4.4.4 Cavidad

Para mejorar el diseño final se decidió optar por la realización de una cavidad que rodease toda la antena. Una vez colocada la cavidad se hacen distintas simulaciones para decidir qué ancho es el adecuado dentro de las especificaciones marcadas, tras la realización de las distintas pruebas se decide que el diseño óptimo se obtiene cuando se le pone un primer ancho de dos milímetros seguido de otra parte que consta de una altura de dos milímetros y ancho igual al del elemento radiante. Con la implementación de este elemento se consigue eliminar las corrientes por el acoplo de elementos dentro de un array, al igual que bajar el parámetro S21.

4.4.5 Red de alimentación

Para completar el diseño de este TFG se ha diseñado una red de alimentación que se une a la antena de referencia que se ha expuesto anteriormente. Con esta alimentación conseguimos dotar de una polarización circular a derechas al diseño (RHCP) y mantener el ancho de banda obtenido. Para esto se implementa una red con dos divisores y un Branchline. El Branchline está formado por dos anillos con los que se obtiene una diferencia de fase de 90° en toda la banda de frecuencias. En dos de sus ramas se colocan conectores SMA con uno se alimenta la antena y al otro se le pone una carga de 50 ohm; las otras dos ramas van conectadas a las entradas de los divisores. Los divisores han sido diseñados para pasar de 36 ohm que es lo que se ve en el Branchline hasta los 48 ohm que son los que se necesita en la salida que se conecta a los puertos de la antena. Además de diseñar los divisores para conseguir este cambio de impedancia, se ha jugado con las medidas y la forma para que se ajuste a los terminales de dicha antena.

Ahora se van a contar las mejoras a realizar en la red de alimentación para llegar a conseguir el resultado óptimo para el diseño.

- Ancho de banda: para mejorar el ancho de banda se plantea la implementación de filtros con stubs dobles en los divisores. Cada tipo de stub realizable para dicha mejora se explica en líneas futuras.
- Rotación secuencial de 4 puertos: para la rotación secuencial se plantea una topología de red de alimentación con un híbrido y dos divisores para obtener los desfases adecuados en los puertos y para el ancho de banda especificado.
- Multicapa: para mejorar la necesidad de la utilización de multicapa, se plantea utilizar materiales cerámicos que tienen una ϵ_r mayor.

4.5 Resultados significativos de las simulaciones en la etapa de diseño

En el último apartado del capítulo 4 se van a mostrar y comentar los resultados más significativos de cada uno de los pasos intermedios utilizados para la obtención final del diseño.

En este sentido, a continuación se van a mostrar los resultados del elemento radiante sin la cavidad y con la cavidad, todo ello analizado en CST. Por último, se va a representar la respuesta de cada una de las partes de la red de alimentación por separado en ADS y posteriormente en CST una vez que se han unido todos los componentes (Branchline y divisores).

4.5.1 Elemento radiante

Tras las modificaciones realizadas al diseño presentado en [2] se consigue el elemento radiante que se puede observar en la figura 4-1.

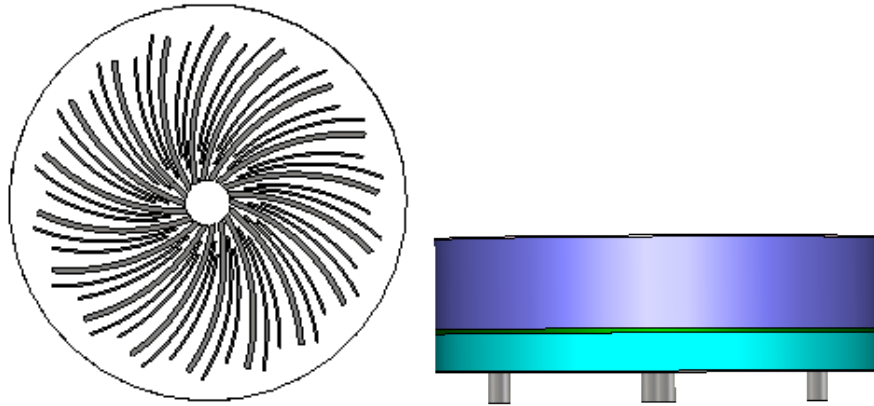


Figura 4-1: Elemento radiante

Como se ha dicho anteriormente, se ha conseguido obtener una mejor respuesta en el parámetro S11. En el diseño anterior se obtiene -15 dB en toda la banda de frecuencias, y como se ve en la figura 4-2, con las mejoras implementadas se obtiene una respuesta del parámetro S11 en la banda de [1.2 a 1.6 GHz] por debajo de -20 dB.

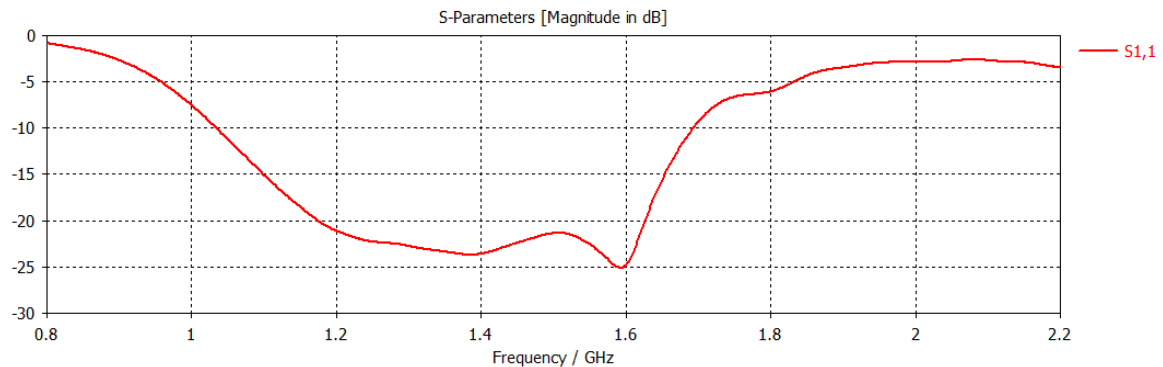


Figura 4-2: Parámetro S11

Una vez se ha mostrado la respuesta del parámetro S11, se pasa a estudiar la fase de dicho diseño. Para conseguir que la fase sea correcta, los puertos de la antena tienen que tener un desfase de 90° entre cada uno.

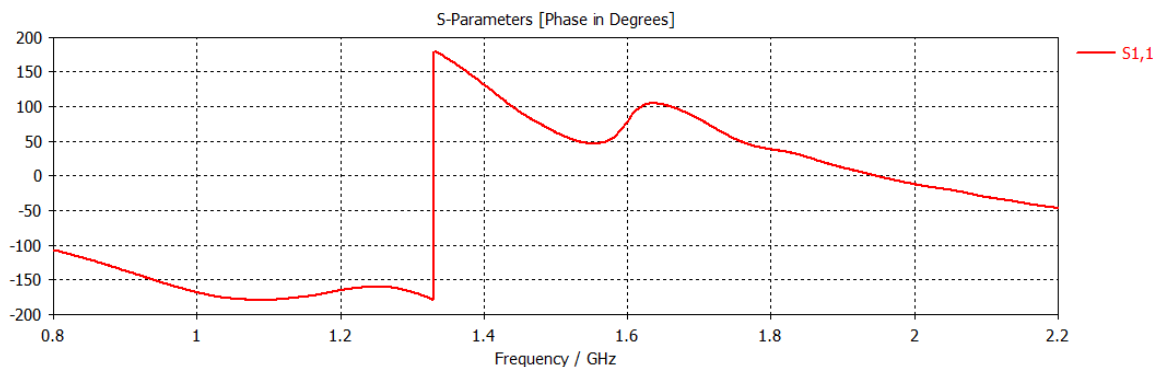


Figura 4-3: Fase parámetro S11

Como se puede observar en la figura 4-4 se tiene una buena relación axial por debajo de 60° en theta para frecuencias que van de 1.164 GHz hasta 1.3 GHz, y para las frecuencias entre 1.559 GHz y 1.593 GHz se tiene una buena relación axial por debajo de 40° en theta.

También se puede observar que, cercano al horizonte, a partir de unos 60° en theta se tiene muy mala relación axial. Para conseguir mejorar dicha relación, se debería poner un polarizador diferente o conformado en la apertura del elemento radiante.

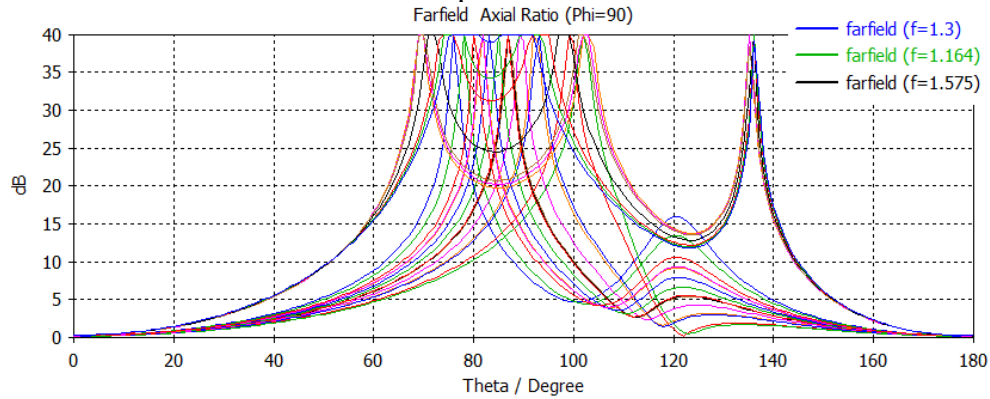


Figura 4-4: Relación axial

A continuación, se va a mostrar la respuesta en la carta de Smith. Para obtener el resultado óptimo se tendría que colocar el "círculo" formado por la curva correspondiente a las frecuencias bajo estudio en el centro de coordenadas, en 1 (impedancias normalizadas a la impedancia de línea), en el caso de la figura 4-5 se puede ver como dicho círculo se encuentra desplazado hacia arriba lo que hace que no se obtenga el mejor resultado ya que la impedancia no es completamente real, sino que tiene también una parte imaginaria.

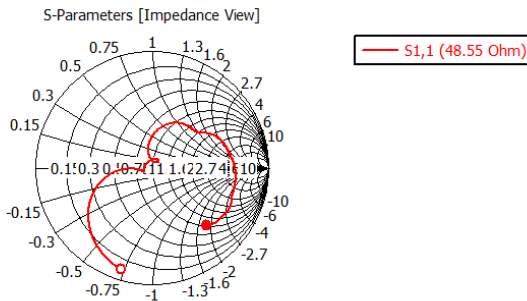


Figura 4-5: Carta de Smith

En la figura 4-6 y la tabla 4-1 se muestra el centro de fase y sigma del elemento y se puede ver la variación de cada uno. Es importante destacar que, para establecer la estabilidad del centro de fase, se ha dividido en dos bandas de frecuencias, la banda inferior y la banda superior; estas dos bandas se pueden observar diferenciadas en la figura 2-1.

En la banda inferior se puede ver en la imagen de abajo que se tiene un centro de fase más compacto; valor pico a pico de 2.57, mientras que en la banda superior el valor pico a pico es de 4.67. Luego el centro de fase en la banda inferior es mejor ya que se quiere conseguir lo más compacto posible.

Por último, se observa que cuando existe más rizado, sigma aumenta.

Tabla 4-1: Centro de fase y sigma

Frecuencia (GHz)	Centro de fase en z [mm]	Sigma
1.164	13.996	0.200491
1.17	14.0836	0.207762
1.188	14.4428	0.250086
1.19	14.4838	0.255809
1.202	14.6967	0.28619
1.214	14.8441	0.301374
1.215	14.8546	0.301856
1.216	14.8649	0.302237
1.228	15.0003	0.30188
1.24	15.2031	0.303896
1.25	15.4371	0.315428
1.251	15.4628	0.317091
1.26	15.7009	0.334462
1.28	16.1704	0.364443
1.3	16.5678	0.36117
1.559	32.9417	1.0999
1.561	33.1998	1.11064
1.563	33.4592	1.12116
1.575	35.0441	1.17763
1.587	36.7179	1.23125
1.59	37.1605	1.24372
1.593	37.6157	1.25602

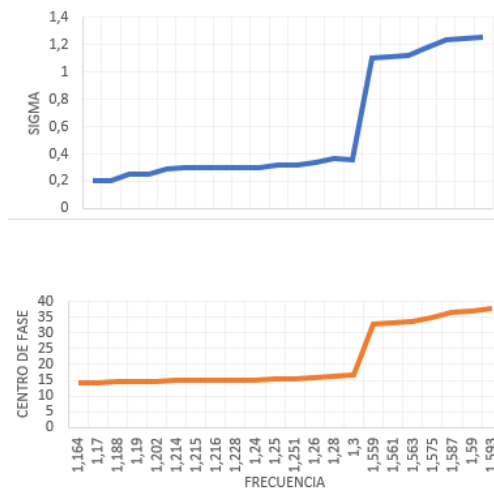


Figura 4-6: Centro de fase y sigma

Como se puede ver en la figura 4-7 el valor de las pérdidas de retorno (VSWR) está dentro de 1.5:1. Luego el diseño comparándolo con las antenas comerciales ya existentes explicadas en el capítulo 3, se puede observar que está dentro del rango de valores óptimos para este tipo de antenas.

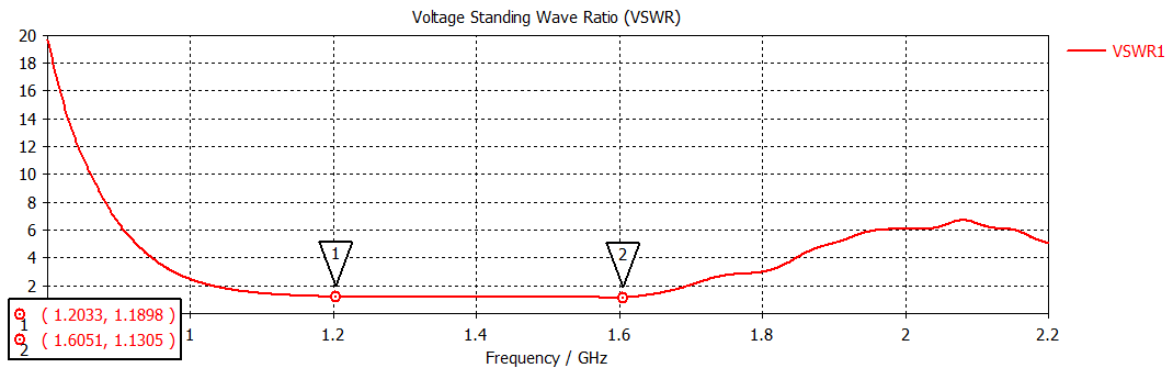


Figura 4-7: VSWR

Finalmente, se muestran las componentes copolar y contrapolar del elemento radiante. Para los dos casos se ha estudiado cuando dejamos fijo $\phi = 90^\circ$ y variamos θ como se aprecia en la figura 4-8, y también se ha obtenido cuando $\phi = 0^\circ$ y se varía θ . En la componente copolar, figura 4-8, se puede apreciar que el campo es muy uniforme entre θ 90-90 y, además no incluye nulos cercanos al horizonte.

Por otro lado, en la componente contrapolar de la figura 4-9, al igual que en la componente copolar, se puede ver como el campo es muy uniforme y con un valor muy bajo en ejes.

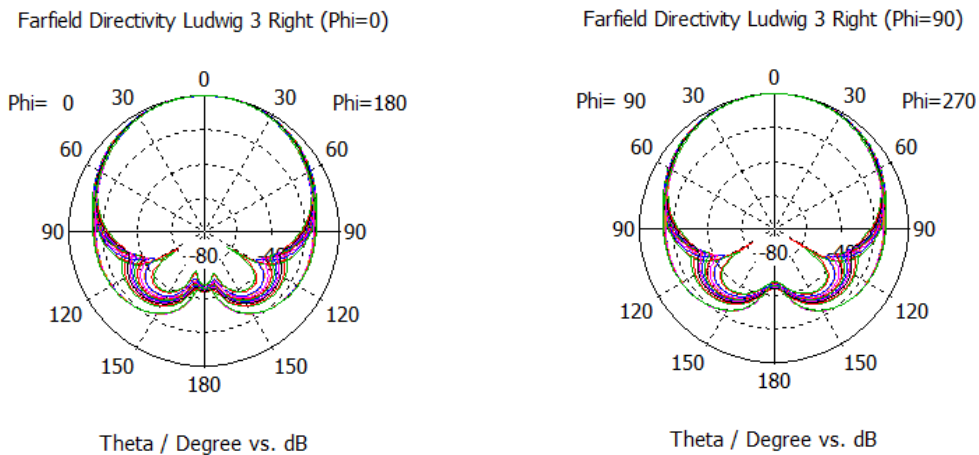


Figura 4-8: Componente Copolar con Phi=0 y Phi=90

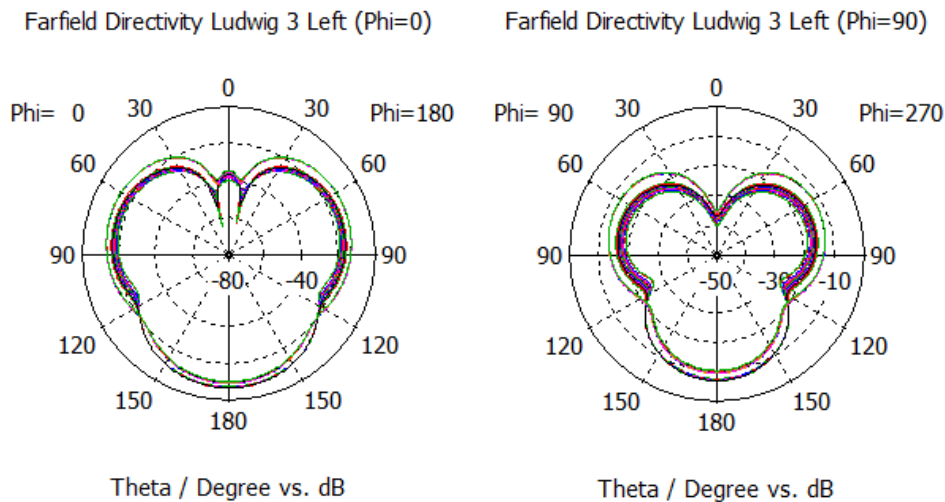


Figura 4-9: Componente Contrapolar con Phi=0 y Phi=90

4.5.2 Elemento radiante con cavidad

Una vez vistos los resultados del elemento radiante, se le añade la cavidad. Con esta cavidad se consigue bajar el parámetro S21, así como eliminar las corrientes por el acoplo producido entre elementos dentro de un array.

Primero se muestra en la figura 4-10 el diseño del elemento radiante con la cavidad.

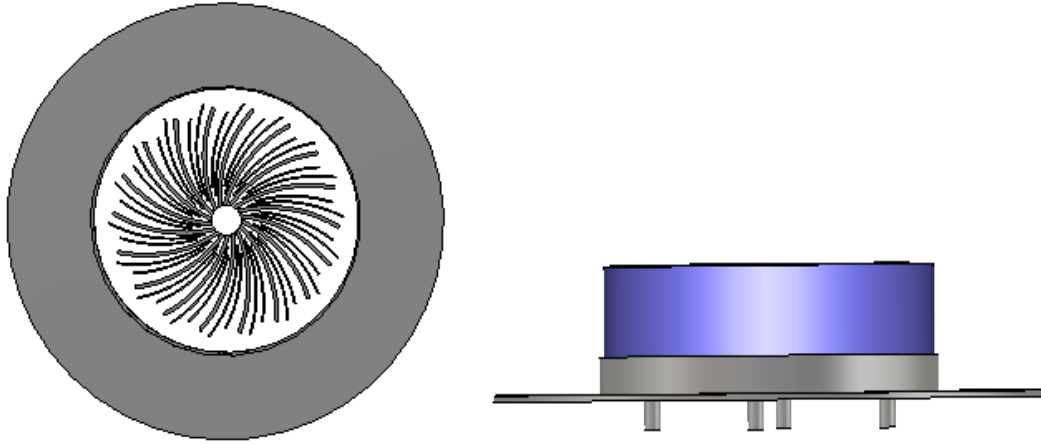


Figura 4-10: Elemento radiante con cavidad

A continuación, se muestra la respuesta del parámetro S11. En la respuesta de dicho parámetro se puede observar como al añadir la cavidad empeora bastante, se pasa de conseguir -20 dB en toda la banda de frecuencia a obtener -12 dB.

Con la implementación de este elemento se obtiene una peor respuesta, pero se consiguen mejorar características importantes para el diseño final.

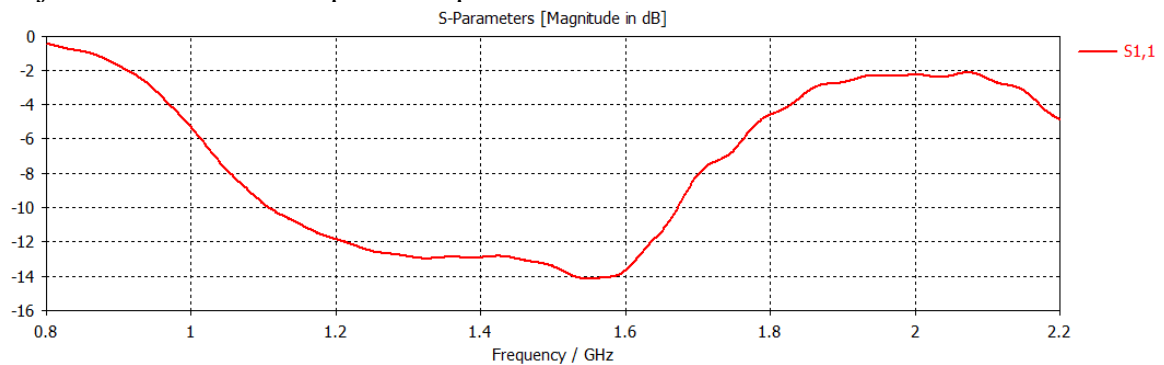


Figura 4-11: Parámetro S11

Una vez se ha visto la respuesta del parámetro S11, se observa la fase. Al igual que ocurría en el caso anterior se busca que los puertos de la antena tengan un desfase de 90° entre cada uno para así obtener RHCP.

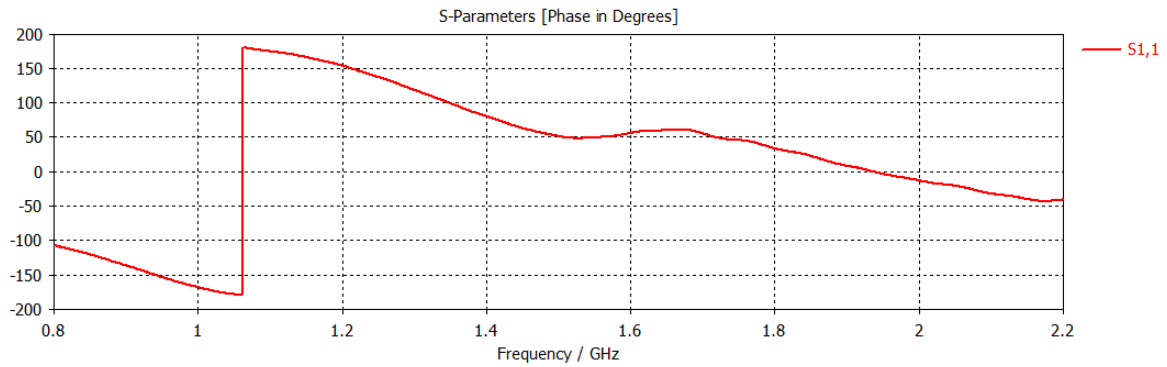


Figura 4-12: Fase parámetro S11

Cuando se le añade la cavidad al elemento radiante se obtiene una pequeña mejora en la relación axial, ya que para las frecuencias de 1.559 GHz a 1.593 GHz se tiene una relación axial por debajo de theta igual a 42° cuando antes era por debajo de theta igual a 40° . Por otra parte, las frecuencias comprendidas entre 1.164 GHz y 1.3 GHz se mantienen con buena relación axial cuando theta es menor a 60° .

Al igual que ocurría en el caso anterior se puede ver que, cercano al horizonte, a partir de unos 60° en theta se tiene muy mala relación axial. Para conseguir mejorar dicha relación, se propone la utilización de un polarizador diferente o conformado en la apertura del elemento radiante como se había comentado previamente en el anterior apartado.

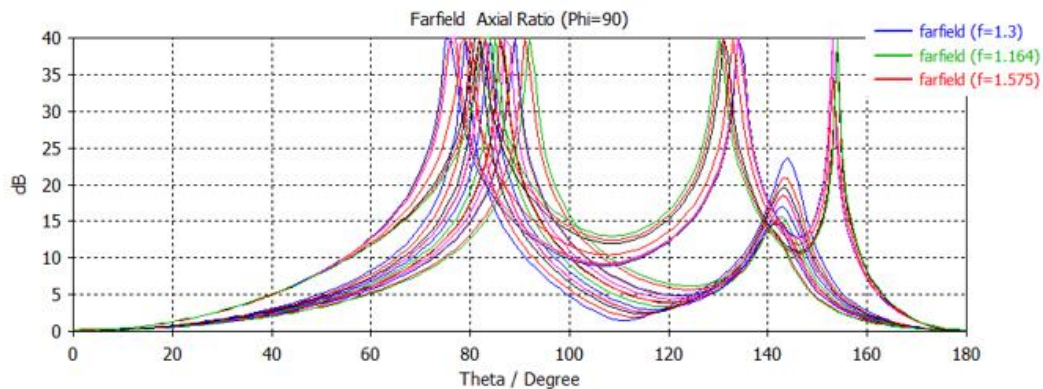


Figura 4-13: Relación axial

Como se ha explicado en la sección anterior para conseguir el resultado óptimo se tiene que llevar el “círculo” formado por la curva correspondiente a las frecuencias bajo estudio al centro de coordenadas, ya que así se consigue eliminar toda la parte imaginaria. Al igual que en el caso anterior no se ha conseguido el resultado más preciso posible.

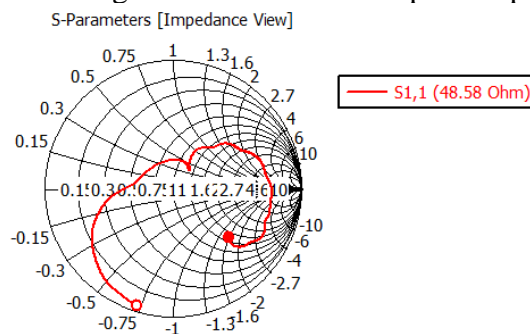


Figura 4-14: Carta Smith

En la figura 4-14 y la tabla 4-2 se muestran los valores del centro de fase y sigma en toda la banda de frecuencias. Al igual que ocurría en el caso del apartado anterior, en las coordenadas x e y el valor del centro de fase es 0 porque se está mostrando una simulación.

También en este caso se ha dividido la banda de frecuencias en dos, la banda inferior y la banda superior. En la banda inferior se tiene un centro de fase compacto; con un valor pico a pico de 2.22mm, y en la banda superior 5.62mm.

Tabla 4-2: Centro de fase

Frecuencia (GHz)	Centro de fase en z [mm]	Sigma
1.164	10.7295	0.570105
1.17	10.8134	0.579626
1.188	10.9696	0.611646
1.19	10.9825	0.61583
1.202	11.081	0.630046
1.214	11.2554	0.621891
1.215	11.2738	0.620732
1.216	11.2928	0.619584
1.228	11.5472	0.617632
1.24	11.8004	0.635084
1.25	11.972	0.657155
1.251	11.9871	0.659393
1.26	12.1119	0.677142
1.28	12.4351	0.693636
1.3	12.9473	0.699634
1.559	27.1792	1.32508
1.561	27.4403	1.32331
1.563	27.7087	1.32038
1.575	29.4945	1.28303
1.587	31.6154	1.23402
1.59	32.1977	1.22752
1.593	32.7995	1.22268

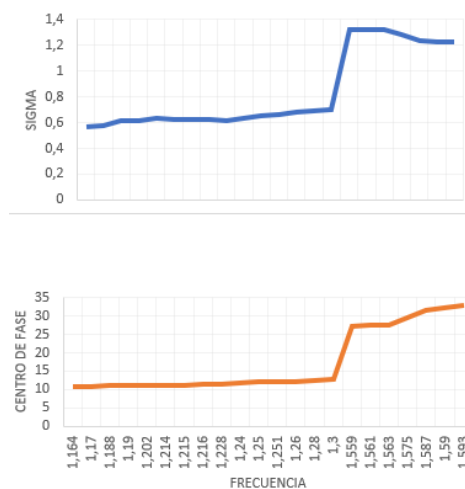


Figura 4-15: Sigma y centro de fase

Según se puede ver en la siguiente figura, se obtienen valores de VSWR un poco más altos que los obtenidos en el caso sin cavidad, pero siguen estando dentro de los límites marcados para este tipo de antenas. Hay antenas comerciales que tienen un valor de VSWR 2:1.

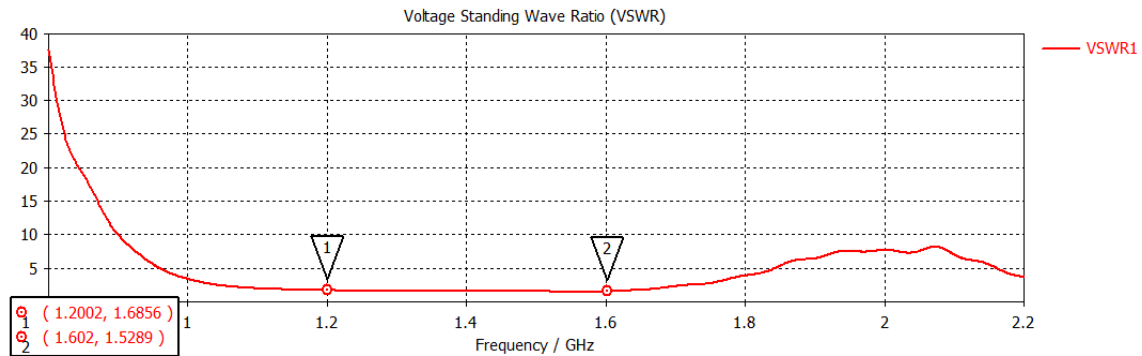


Figura 4-16: VSWR

Una vez que se ha explicado todos los resultados anteriores se pasa a mostrar las componentes copolares y contrapolares del sistema. Al igual que antes se van a enseñar las componentes para $\phi = 0^\circ$, variando θ y $\phi = 90^\circ$ esta a su vez también variando θ .

En el caso que se añade la cavidad al elemento radiante, se puede observar en las figuras 4-17 y 4-18; componente copolar y contrapolar respectivamente, al igual que ocurría en el caso sin cavidad se obtiene un campo muy uniforme y sin nulos cerca del horizonte.

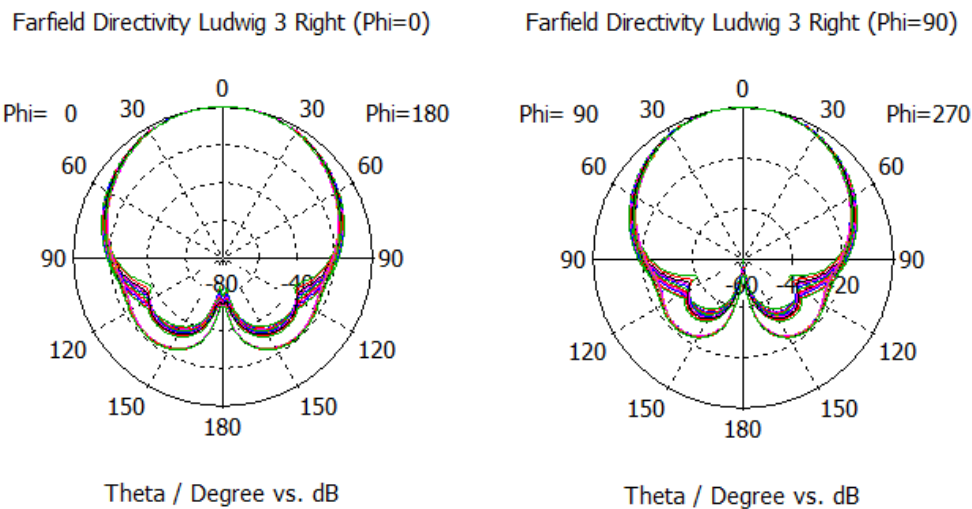
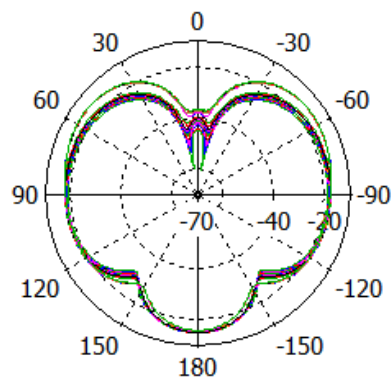


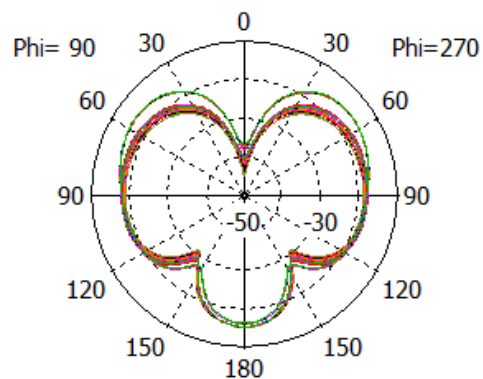
Figura 4-17: Componente Copolar con Phi=0 y Phi=90

Farfield Directivity Ludwig 3 Left (Phi=0)

Farfield Directivity Ludwig 3 Left (Phi=90)



Theta / Degree vs. dB



Theta / Degree vs. dB

Figura 4-18: Componente Contrapolar con Phi=0 y Phi=90

4.5.3 Red de alimentación por separado

Una vez se ha terminado el elemento radiante con la cavidad, se pasa a diseñar la red de alimentación. Como se ha explicado anteriormente dicha red consta de dos divisores y un Branchline para así conseguir obtener una polarización circular a derechas (RHCP). Para la construcción de dicha red se van a diseñar cada uno de los componentes por separado, obteniendo una buena respuesta y una fase adecuada en toda la banda de frecuencias para cada uno de ellos.

En el anexo 2 se explica cómo se ha ido realizando cada componente teniendo en cuenta las medidas de la antena, las impedancias, la fase...

Primero se va a empezar explicando cómo se ha diseñado el Branchline, este componente se tiene que ajustar a las medidas del elemento de referencia luego se ha diseñado teniendo en cuenta dichas dimensiones. Consta de dos anillos a los que se les ha añadido stubs como se observa en la figura 4-19 para así obtener una mejor respuesta. Con el Branchline se pretende conseguir un desfase de 90° en la red, además a través de una de sus ramas se va a alimentar el diseño final y con otras dos de sus ramas se va a unir a los divisores.

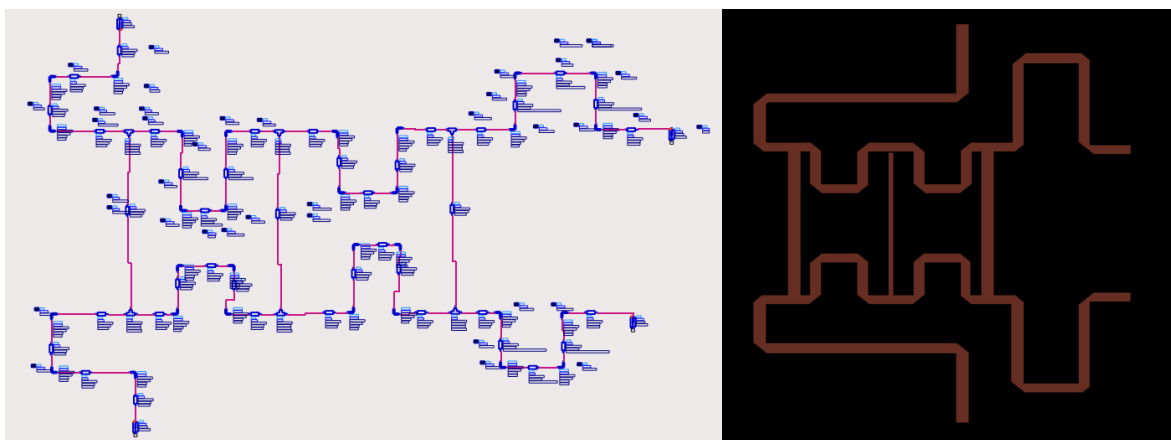


Figura 4-19: Branchline

A continuación, se va a mostrar la respuesta obtenida del Branchline. Como se puede apreciar en la figura 4-20 se consiguen -19 dB en toda la banda de frecuencia (1.2-1.6 GHz).

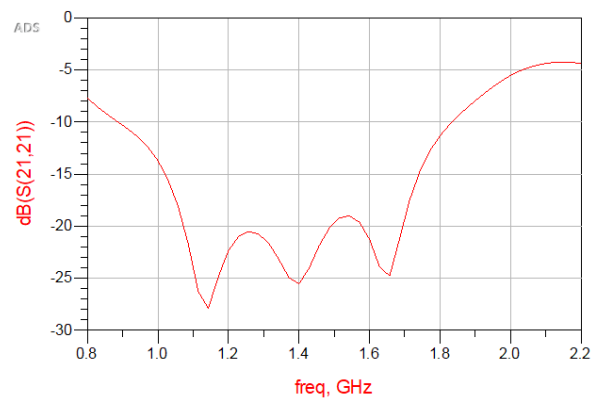


Figura 4-20: Parámetro S11 del Branchline

Una vez conseguida una respuesta que cumple los requisitos, se pasa a obtener una fase correcta. Dicha fase se puede observar en la figura 4-21 y se puede ver como en toda la banda requerida por el diseño se tiene una fase de 90° con una diferencia de $\pm 4^\circ$.

m1 freq=1.229GHz phase(S(21,19))-phase(S(20,19))=-267.728	m2 freq=1.400GHz phase(S(21,19))-phase(S(20,19))=89.997	m3 freq=1.600GHz phase(S(21,19))-phase(S(20,19))=89.803
---	---	---

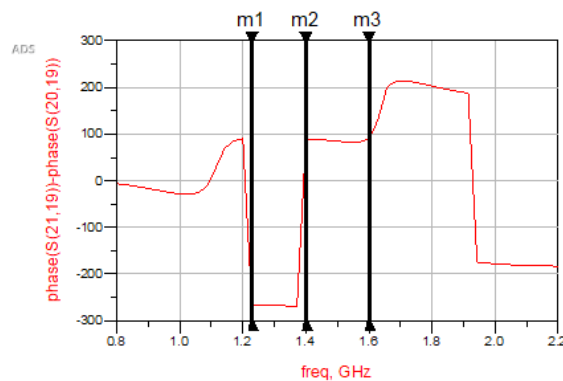


Figura 4-21: Fase del Branchline

Después de hablar del Branchline, se pasa a mostrar cada uno de los divisores. Primero se va a comentar el divisor que se va a colocar en vertical una vez este unida toda la red de alimentación. En este divisor se ha añadido un Stub para conseguir un desfase de 180° de una rama respecto a la otra.

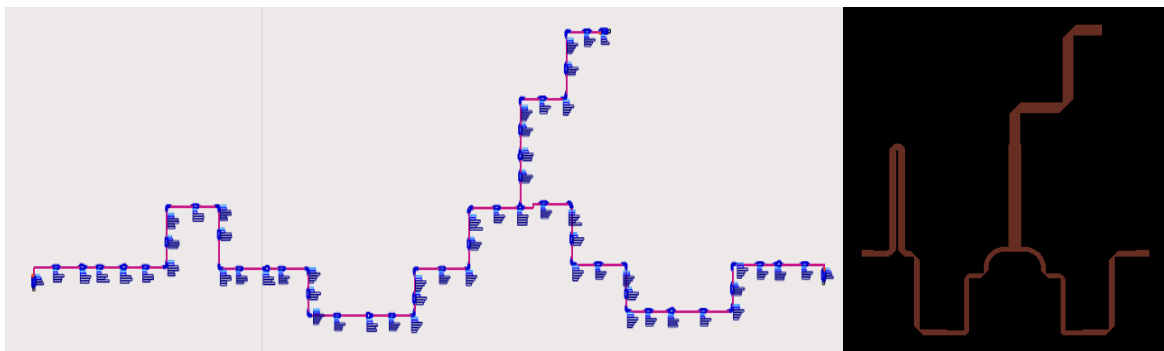


Figura 4-22: Divisor Vertical

Para el divisor vertical, se consigue una adaptación de -30 dB en toda la banda de frecuencias requeridas por el sistema (1.2 GHz – 1.6 GHz), lo cual es una buena adaptación del parámetro S11.

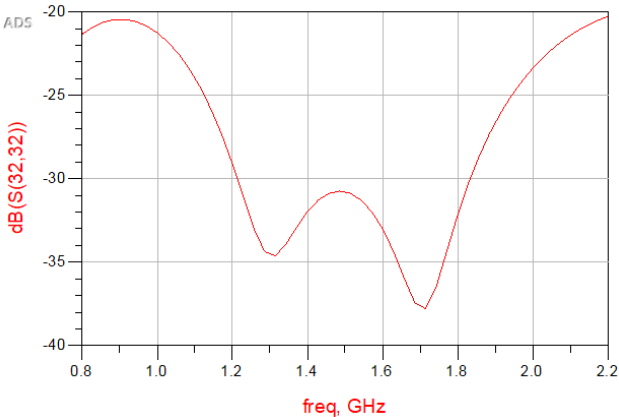


Figura 4-23: Parámetro S11 del divisor vertical

Para conseguir un divisor óptimo se necesita tener 180° con una variación de ± 4° en todas las frecuencias dentro de la banda de trabajo. En este caso se consigue 180° con su respectiva variación en 60 MHz que van desde 1.37 GHz a 1.43 GHz.

m 15 freq=1.371GHz phase(S(31,32)/S(33,32))=-176.453	m 16 freq=1.400GHz phase(S(31,32)/S(33,32))=-179.969	m 17 freq=1.429GHz phase(S(31,32)/S(33,32))=176.549
--	--	---

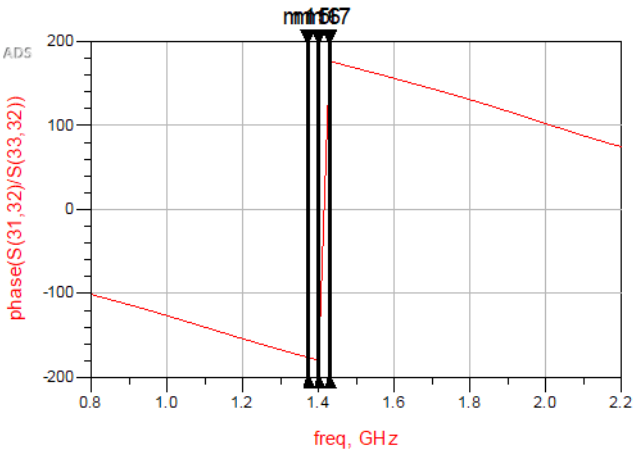


Figura 4-24: Fase del divisor vertical

Por último, se va a enseñar el divisor horizontal dentro de la red de alimentación. Este divisor como ocurría con el explicado anteriormente; se le ha añadido un Stub para conseguir el desfase de 180° que se necesita.

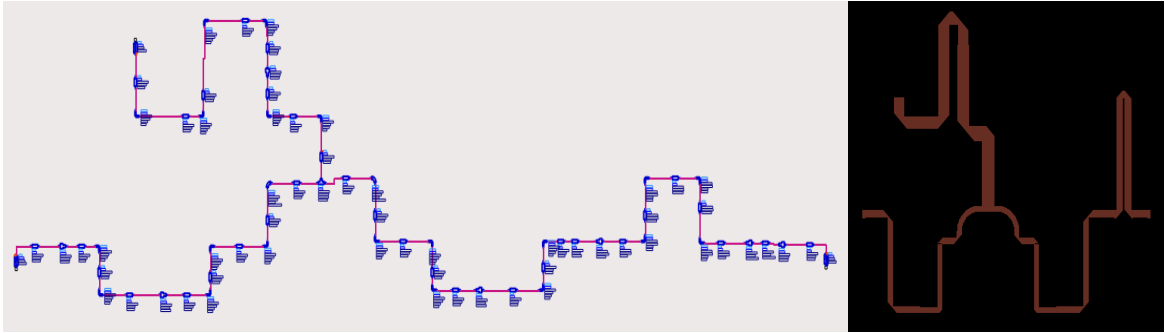


Figura 4-25: Divisor Horizontal

La respuesta de este componente al igual que el anterior cumple muy bien con las especificaciones ya que se consiguen -30 dB para todas las frecuencias de la banda.

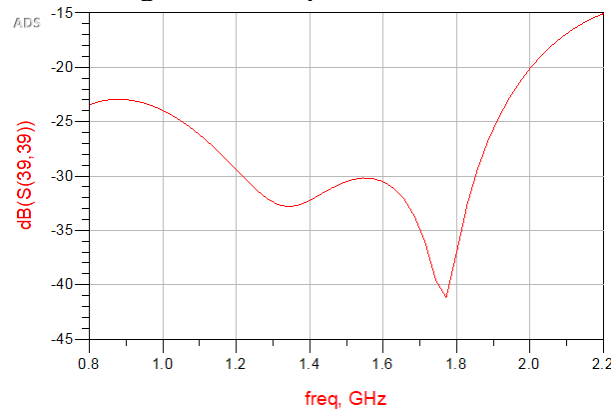


Figura 4-26: Parámetro S11 del divisor horizontal

Para finalizar este apartado se va a mostrar la fase del divisor, el cual tiene que tener una fase en torno a 180° como en el caso anterior. Como se puede observar en la siguiente figura se obtienen dichos grados en una banda de 60 MHz.

m18 freq=1.371 GHz phase(S(38,39)/S(37,39))=-177.789	m19 freq=1.400 GHz phase(S(38,39)/S(37,39))=178.684	m20 freq=1.429 GHz phase(S(38,39)/S(37,39))=175.173
--	---	---

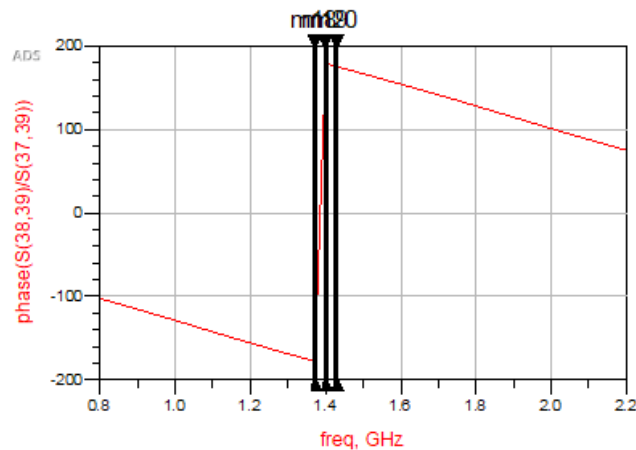


Figura 4-27: Fase del divisor horizontal

4.5.4 Red de alimentación unida

Para finalizar se va a contar como se ha unido la red de alimentación en CST y se van a mostrar los resultados obtenidos. Con los componentes explicados anteriormente (Branchline y dos divisores), se pasa a la unión de la red. Esta unión se realiza exportando cada uno de los elementos de ADS y a través de unas vías diseñadas en CST se procede a la construcción final de dicha red.

Esta red una vez se ha terminado se junta a su vez al elemento radiante construido previamente en CST. Esta unión se realiza a través de los conectores SMA; diseñados en la antena, que van a ir conectados a los puertos de los divisores.

Al simular la red de alimentación completa obtenemos una respuesta por debajo de -15 dB en toda la banda de frecuencias requerida por el sistema.

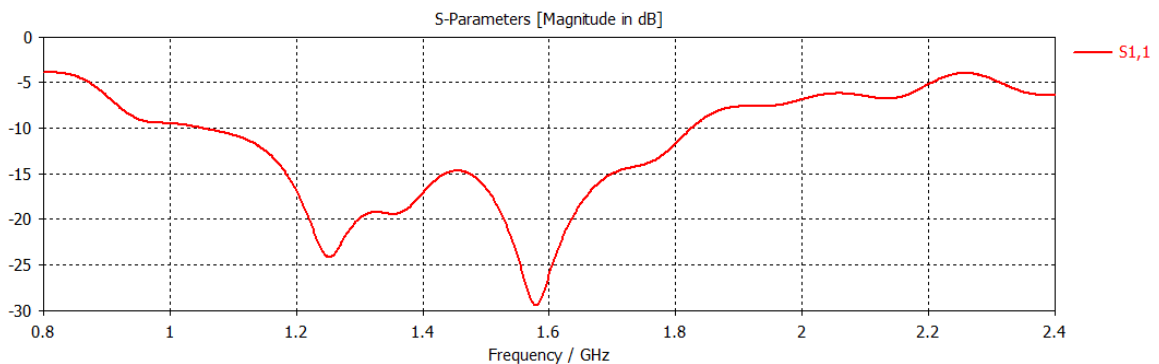


Figura 4-28: Parámetro S11

Para comprobar que la fase cumple con los requisitos especificados, se resta la fase del puerto que se quiere obtener menos la fase del puerto de referencia (el de 0°). Como se puede ver en la figura 4-29 se tienen -90°, -180° y -270°, que esto se consigue de restar 360° a la fase de cada puerto que se va a mirar.

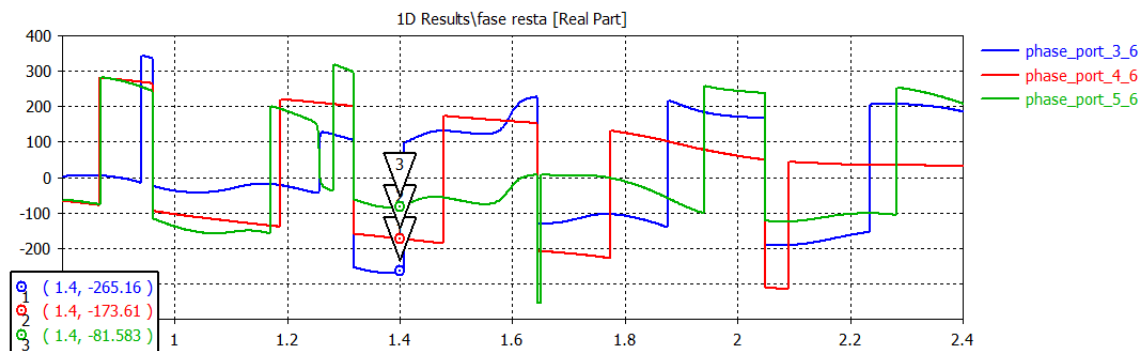


Figura 4-29: Fase puertos

5 Integración, pruebas y resultados

Finalmente, en este capítulo se muestra el diseño final, que está formado por el elemento radiante con cavidad unido a la red de alimentación que se ha diseñado para obtener la polarización circular a derechas. Este diseño se puede ver en la figura 5-1.

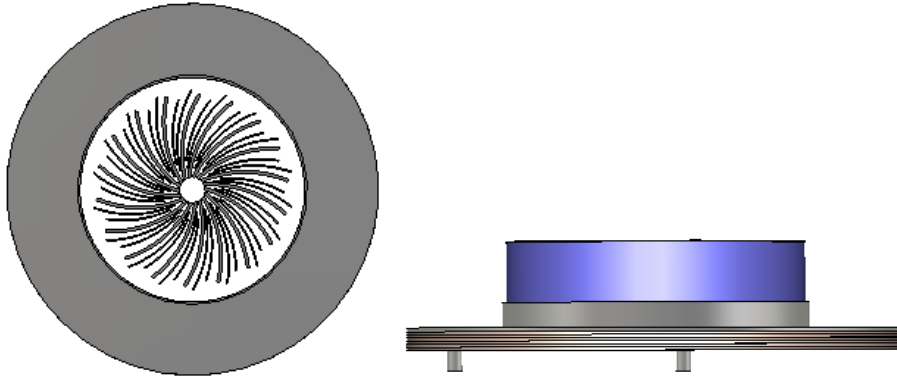


Figura 5-1: Elemento radiante con red de alimentación

Como se aprecia en la figura 5-2, se ha conseguido una respuesta del parámetro S11 con una adaptación por debajo de -10 dB en toda la banda de frecuencia requerida por el sistema [1.2 – 1.6 GHz].

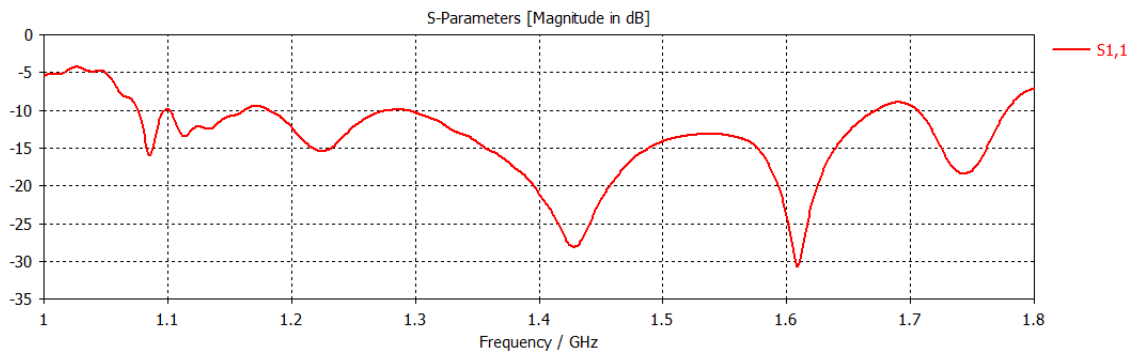


Figura 5-2: Parámetro S11

En la figura 5-3 se muestra la fase del parámetro S11, esta fase al igual que en los casos anteriores se busca que tenga un desfase de 90° para conseguir una polarización circular a derechas.

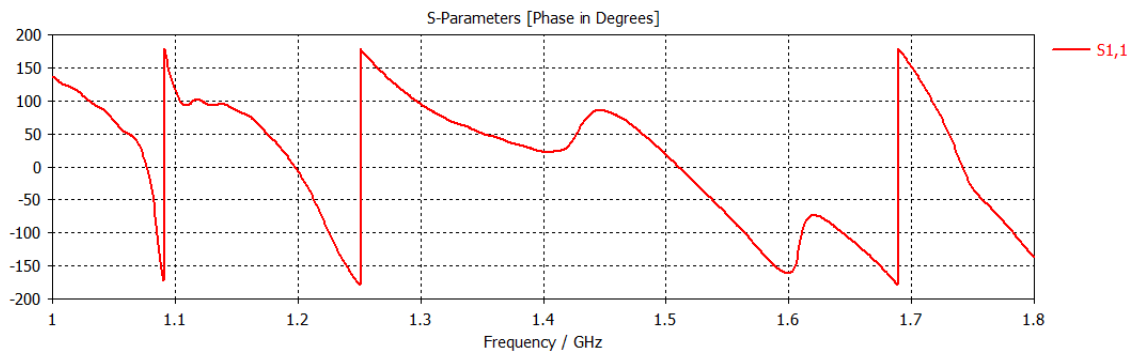


Figura 5-3: Fase parámetro S11

Para la relación axial del diseño final se ha decidido mostrar tres frecuencias que se encuentran dentro de la banda conseguida en la red de alimentación (1.32 GHz – 1.4 GHz). Para 1.32 GHz se consigue una buena relación axial para theta igual a 30°, mientras que para las dos frecuencias superiores se tiene una buena relación axial para todo theta menor a 45°.

Se puede ver también que, en el horizonte para theta igual a 80° se tiene una mala relación axial.

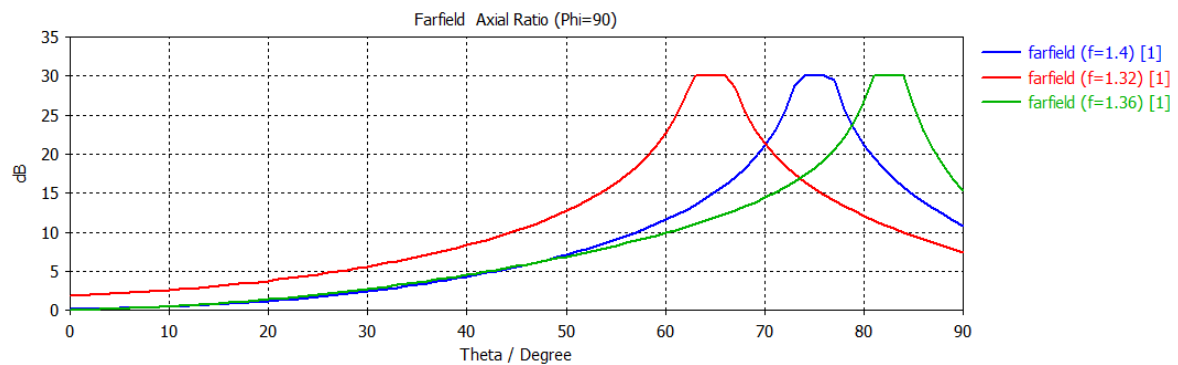


Figura 5-4: Relación axial

En este caso se puede ver en la figura 5-5 que el “círculo” se encuentra centrado en torno a 1 como es el caso óptimo, y en este caso se elimina toda la parte imaginaria.

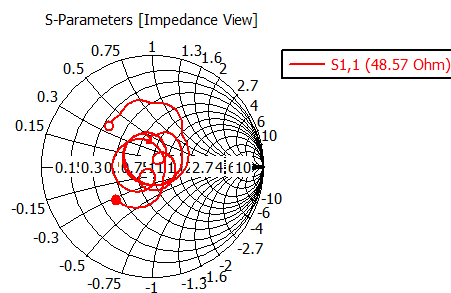


Figura 5-5: Carta Smith

En este caso, para los resultados finales se utilizaría el centro de fase obtenido en los resultados del elemento radiante con cavidad ya que se ha utilizado dicho diseño para la unión con la red de alimentación. Se utilizan dichos resultados porque al no obtener en la red de alimentación todo el ancho de banda requerido no se puede estudiar, ni obtener el centro de fase del diseño final correctamente.

Las pérdidas de retorno como se puede ver en la imagen que va a continuación, está dentro de 2:1 que es el rango de valores correcto según el estado del arte para las antenas de sistemas GNSS. Luego cumple con las especificaciones necesarias en las antenas comerciales de estos sistemas.

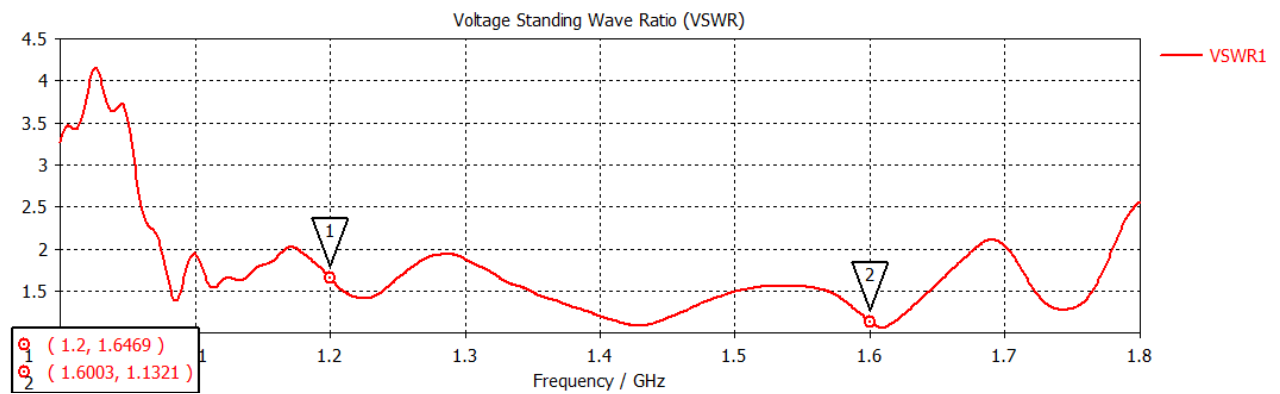


Figura 5-6: VSWR

Se puede ver que en la componente copolar entre theta 90 – 90 se tiene un campo muy uniforme y sin nulos cerca del horizonte. Con la componente contrapolar al igual que ocurre con la copolar se tiene un campo muy uniforme en el horizonte.

Tabla 5-1: Valores de directividad y ancho de haz para copolar y contrapolar

Frecuencia (GHz)	Directividad Copolar phi 90 (dBi)	Ancho de haz a -3dB Copolar (°)	Directividad Contrapolar phi 90 (dBi)	Ancho de haz a -3dB Contrapolar (°)
1.32	7.87	68	-4.54	85.7
1.36	8.55	64.9	-5.67	85.9
1.4	8.61	63.4	-5.59	87.3

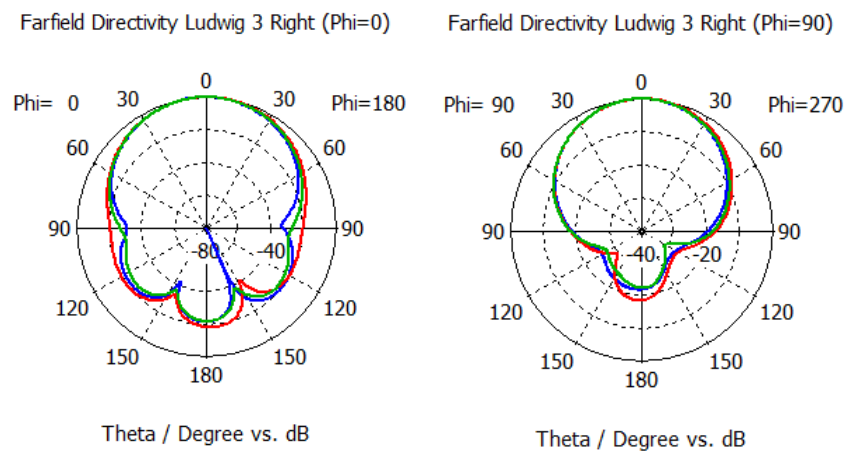
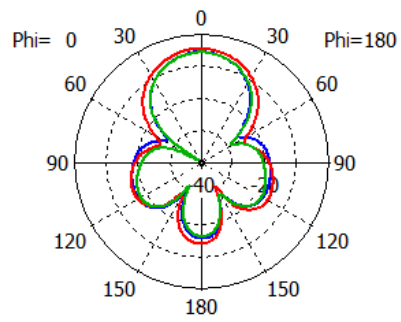


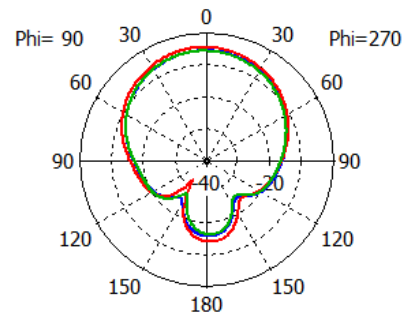
Figura 5-7: Componente Copolar con Phi=0 y Phi=90

Farfield Directivity Ludwig 3 Left ($\Phi=0$)



Theta / Degree vs. dB

Farfield Directivity Ludwig 3 Left ($\Phi=90$)



Theta / Degree vs. dB

Figura 5-8: Componente Contrapolar con $\Phi=0$ y $\Phi=90$

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

En este TFG he aprendido sobre los sistemas GNSS, así como con las bandas de frecuencias a las que operan, servicios que prestan y aplicaciones de la tecnología de navegación por satélite. Esto lo he podido aprender gracias al estudio del estado del arte y de la técnica, a la optimización y a las etapas de diseño del elemento radiante y de la red de alimentación.

Con el elemento radiante se ha ido viendo como varía la adaptación y la relación axial al modificar el parche, pero sobre todo al cambiar las dimensiones y la curvatura del polarizador. Además de poder elegir entre distintos polarizadores con sus características específicas. Para el diseño de dicho elemento se ha trabajado con el programa CST, por lo que se ha aprendido también, en la utilización de dicho programa, así como el descubrimiento de nuevas funciones dentro del mismo.

Por otro lado, la red de alimentación se ha diseñado en el programa ADS, obteniendo las prestaciones esperadas según las especificaciones de la red de alimentación en cuanto a adaptación y desfase entre puertos para un 6% de banda o un 20% de la banda de GNSS, y luego, la red de alimentación de elemento radiante se ha implementado en el programa de diseño electromagnético CST. Durante la implementación de la red de alimentación en CST se identificaron problemas de diseño en componentes de la red como vías y divisores de potencia. La red de alimentación se ha ido diseñando por partes, por lo que se ha ido evaluando sus prestaciones desde los puertos de salida o carga, pasando por cada parte por separado hasta llegar al puerto de entrada de la red. Finalmente, se ha evaluado su comportamiento al completo y también integrando el elemento radiante o antena.

Por otro lado, se ha podido profundizar en la correcta utilización del programa y a trabajar con los archivos de ambos programas para el desarrollo de un proyecto.

En un principio se parte del elemento radiante diseñado por María, el cual ha sido optimizado modificando el polarizador para así obtener una mejor adaptación en todo el ancho de banda. Después de esto, se decidió añadir una cavidad al elemento para poder eliminar las corrientes al utilizar el elemento como parte de un array de antenas. Finalmente, se diseñó una red de alimentación con la que se dota de polarización circular a derechas a la antena y se mejora el ancho de banda final.

En el diseño final se ha obtenido una buena respuesta del parámetro S_{11} , un buen desfase en la banda entre 1.32 GHz a 1.4 GHz y un buen valor de pérdidas de retorno, ya que cumple las características de las antenas comerciales. En este diseño final no se ha conseguido todos los resultados correctamente, en el caso de la red de alimentación se debería haber conseguido un desfase de 90° entre cada puerto en toda la banda de frecuencia requerida (1.2 GHz – 1.6 GHz) pero se ha obtenido en la banda nombrada anteriormente. Para conseguir mejorar estos resultados se propone utilizar stubs dobles en los divisores como se explica en las líneas futuras.

6.2 Trabajo futuro

En este TFG se ha optimizado el diseño que había realizado María a partir de la mejora realizada en los dipolos que actúan como polarizadores. Además de esto se ha diseñado una red de alimentación para el elemento radiante ya optimizado.

Para la obtención de unos mejores resultados en el diseño final se va a tratar de optimizar la red de alimentación. Una de las mejoras que se proponen, sería la obtención de 180° en fase para los divisores en toda la banda de frecuencias. Para esto se van a probar tres formas distintas de optimización:

- Utilización de dos stubs: al stub que ya se tiene diseñado en los divisores, se le coloca otro al lado pero mirando hacia el lado contrario [21, 22].
- Utilización de stubs dobles: al stub ya diseñado se le añade otro stub encima [23].
- Utilización de un stub en T: el stub que ya se ha construido se modifica y se le pone con forma de T [24].

Con estos tres diseños distintos se trata de aumentar el ancho de banda y como consecuencia se va a tratar de conseguir los 180° en fase en toda la banda de frecuencias.

Por otro lado, también se puede hacer un diseño de array de antenas, ya que con la cavidad añadida al diseño no habrá superposición de corrientes y se conseguirá unos mejores resultados finales. Este array se utiliza para eliminar las interferencias y colocar el nulo en la dirección que más convenga para el diseño.

7 Referencias

- [1] A. P. Quintana, *Diseño de antenas para estaciones de GPS mediante parametrización de las corrugaciones de choke*.
- [2] M. Pablo Fernández, *Desarrollo de una antena banda ancha para sistemas de navegación por satélite*, 2017.
- [3] A. Domínguez, «Sistemas de posicionamiento por satélite,» 19 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://spsaragon1.blogspot.com/2015/08/>.
- [4] D. A. García Álvarez, *Sistema GNSS*, 2008.
- [5] B. Rama Rao, W. Kunysz, R. Fante y K. McDonald, GPS/GNSS ANTENNAS.
- [6] J. Montaña, «Polarización Circular. Antenas para trabajar satélites en VHF y UHF,» *Unión de radioaficionados españoles*, 2016.
- [7] D. B. Moskoff y W. G. Kaag, «Threats to Global Navigation Satellite Systems,» *MarineLink*.
- [8] J. L. Masa Campos, *Antenas y Compatibilidad Electromagnética*.
- [9] J. A. Ruiz Cruz, *Medios de transmisión*.
- [10] D. M. Pozar y J. Wiley & Sons, Microwave Engineering.
- [11] *Dispositivos Pasivos de Microondas: Redes de 3 y 4 accesos*, 2009.
- [12] G. Expósito-Domínguez, J. Fernández-González, P. Padilla y M. Sierra-Castañer, *Matriz de Butler de Banda Ancha en Banda X para Antenas Reconfigurables*.
- [13] G. Bahillo Ubero, *Desarrollo de una antena en tecnología microstrip para un sistema nano-SAR*, 2017.
- [14] C. A. Balanis, ANTENNA THEORY Analysis and design.
- [15] Exelis, *DM C146 Series GPS Antenna*.
- [16] J. Walford, *Leica GNSS Reference Antennas*.
- [17] NovAtel, *Antennas GNSS-750 Revolutionary GNSS Wideband antenna enhances accuracy and performance*.
- [18] NovAtel, *Antennas GPS-701-GG & GPS-702-GG Pinwheel antennas enhance flexibility and reduce costs*.
- [19] Thales, *Choke Ring Antenna*.
- [20] B. F. Hornecker, *Design of novel radiating elements for SATCOM phased arrays in Ku-Band*.
- [21] B. M. Schiffman, *A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters*.
- [22] J. E. Page y J. Esteban, *Dual-Band Matching Properties of the C-Section All-Pass Network*.
- [23] J. E. Page, J. Esteban y C. Camacho-Peñalosa, *Lattice Equivalent Circuits of Transmission-Line and Coupled-Line Sections*.
- [24] S. Raut y A. Petosa, *GPS Wideband Microstrip Antenna Array Featuring Compact Schiffman Phase Shifters*.
- [25] A. Rufer, J. R. Mosing, N. Vksadinovic, X. Begaud, I. Stevanovic y F. Rachidi-Haeri, *Design of novel radiating elements for SATCOM phased arrays in Ku-band*.
- [26] F. Pérez Martínez, «Galileo, El futuro sistema de navegación europeo,» Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

[27] Argudo Domínguez, «s,» [En línea].

8 Glosario

API	Application Programming Interface
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
RHCP	Polarización circular a derechas
GLONASS	Sistema de navegación por satélites de Rusia
COMPASS	Sistema de navegación de China
Galileo	Sistema de navegación de la Unión Europea
WAAS	Wide Area Augmentation System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
MSAS	Multifunctional SATellite-Based Augmentation System
GAGAN	GPS and Geoaugmented Navigation
FRPA	Fixed Radiation Pattern Antenna
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

9 Anexos

9.1 Diseño elemento y polarizador

El elemento radiante está formado por 4 partes distintas, entre las que podemos encontrar cuatro sondas del parche pasivo, el parche activo, el parche con dipolos parásitos y la cavidad.

Las primeras dos partes (sondas del parche pasivo y el parche activo) después de probar con distintas simulaciones se mantuvo la forma y dimensiones realizadas por María en su diseño, ya que eran las óptimas para los resultados finales que se quieren obtener.

Una vez se ha probado a cambiar las dos partes anteriores, se pasa a modificar la tercera parte que son los dipolos parásitos que actúan como polarizador. En este caso estos componentes si han sido modificados para obtener una mejor adaptación, dichos dipolos han cambiado en forma, dimensiones y tamaño. Primero se modificaron sus dimensiones a ver si variando el ancho, largo y la separación entre ellos se podía obtener una mejora significativa en la respuesta del parámetro S_{11} ; al no ser posible, se estudiaron distintos casos de cómo cambiar la forma y así conseguir unos mejores resultados de acuerdo con las especificaciones. Se optó por diseñarlos utilizando un círculo con el ancho final que se quiera poner a cada dipolo y a ese círculo con tres cuadrados como se puede observar en la figura 9-1 se le quita la distancia que se quiera para obtener el largo óptimo. Este proceso se realiza parametrizando los cuadrados para así poder hacer un barrido con distintos tamaños hasta conseguir el que mejor se ajuste al diseño.

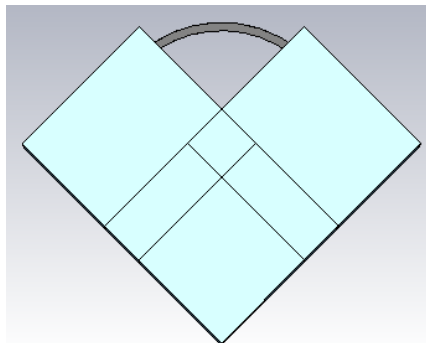


Figura 9-1: Diseño dipolos

Este procedimiento se realizará tres veces para conseguir el ancho, largo y forma de cada tipo de dipolos ya que en el diseño se obtienen tres tipos distintos para conseguir mejores resultados.

Como se puede observar en la figura 4-2 los dipolos son concéntricos respecto al origen y tienen una curvatura hacia la derecha. En la tabla mostrada a continuación se ven las medidas de dichos dipolos.

Tabla 9-1: Medidas de los dipolos

	Dipolo 1	Dipolo 2	Dipolo 3
Largo interior	28.86 mm	21.71 mm	27.53 mm
Largo exterior	30.45 mm	22.40 mm	28.20 mm
Ancho	2.16 mm	0.95 mm	0.92 mm

Finalmente, se diseña una cavidad que como se ha citado anteriormente sirve para eliminar las corrientes producidas por acoplo entre elementos dentro de un array. Se ha ido probando distintos tamaños de dicha cavidad para ver cómo afecta a la adaptación del elemento.

9.2 Diseño red de alimentación

El diseño de la red de alimentación se ha realizado en ADS. Como se ha comentado anteriormente este diseño consta de dos divisores y un Branchline que se han diseñado cada uno por separado para luego llegar a la unión de los tres.

Primero se ha diseñado el divisor vertical, se parte de una impedancia de 48 ohm (impedancia que se ve en los puertos de la antena de referencia) y a través de dos landa cuartos se va a subir hasta una impedancia de 60 ohm que se va a ver en la T. Además de utilizar los landa cuartos también se utilizan codos para poder darle la forma que requiere el diseño y sstep para unir dos pistas con distinto ancho debido al cambio de impedancia. En la imagen que se observa a continuación, se pueden ver los elementos citados, los cambios de impedancia y la forma necesaria para el diseño.

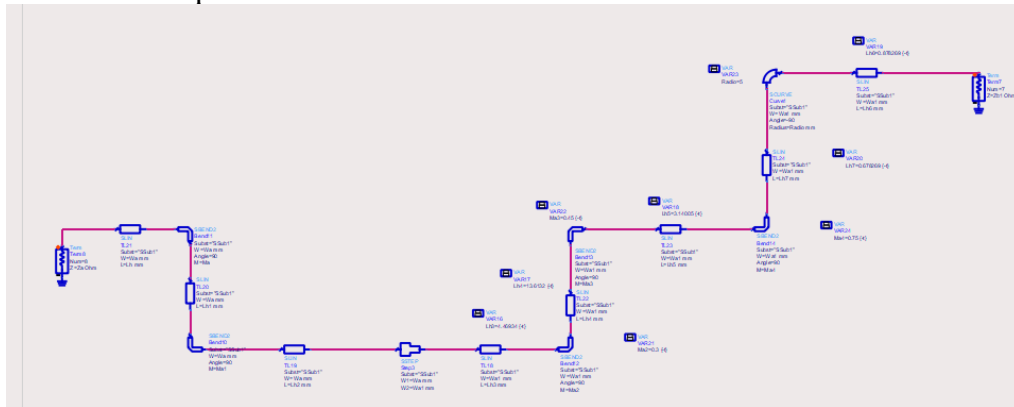


Figura 9-2: Parte 1 divisor

Una vez se tiene esta parte del divisor se replica y se hace mirror para conseguir la otra rama del divisor. Cuando se tienen las dos ramas pasando de los 48 ohm que tenemos en los puertos a los 60 ohm que se necesitan en la T; se continua con la realización del divisor. Al pasar por la T se pasa de tener una impedancia de 60 ohm a tener 30 ohm, estos 30 ohm a través de otros dos landa cuartos se lleva a conseguir 36 ohm a la entrada del divisor. Luego los 36 ohm obtenidos a la entrada del divisor irán unidos a una de las salidas del Branchline.

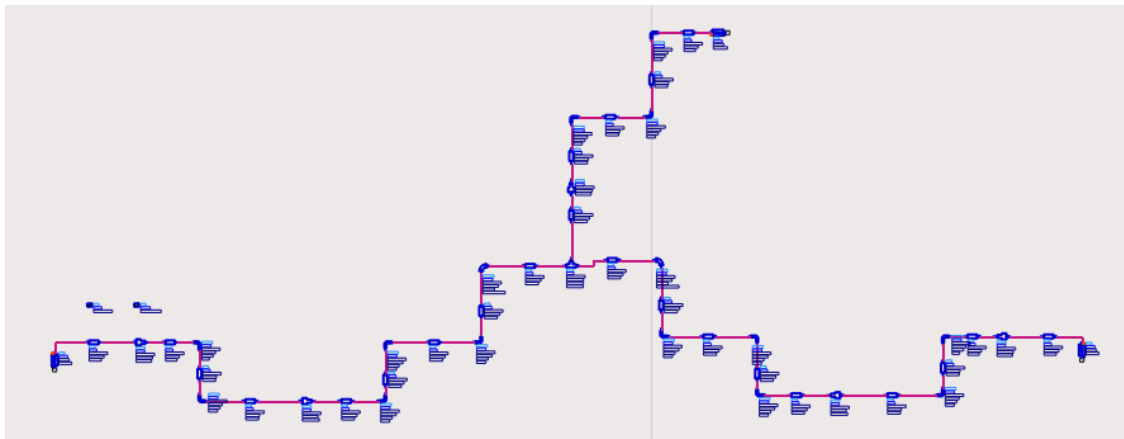


Figura 9-3: Divisor vertical

En la figura 9-3 se observa el diseño final del divisor vertical con la forma adecuada para que se acople al elemento radiante. A este diseño le faltaría ajustar la fase a 180° ; esto se consigue añadiendo un stub en la rama en la que se quiere que este desfasado 180° respecto a la otra.

En la figura 9-4 se aprecia el diseño del stub en la rama de la izquierda para conseguir el desfase necesario en el divisor. Para la construcción de dicho stub se ha ido ajustando poco a poco las distancias con el tuning.

Finalmente se obtiene el diseño ajustado del divisor vertical.

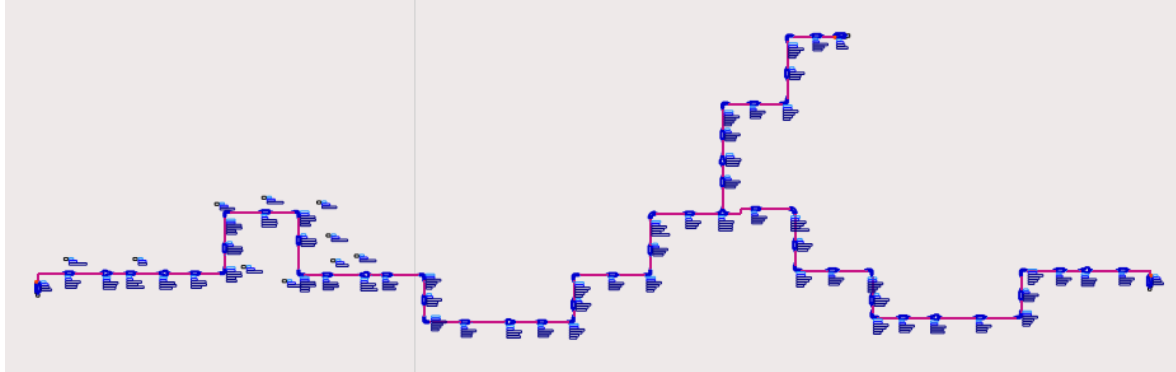


Figura 9-4: Divisor vertical con stub

Para el divisor horizontal se sigue el mismo proceso que el utilizado en el divisor vertical hasta llegar a la T. Una vez se han conseguido 60 ohm en la T, se pasa a conseguir a través de los landa cuartos y los codos los 36 ohm a la entrada. La forma de la última parte del divisor como se ve en la figura 9-5 no es igual a la que se tiene en el divisor vertical; ya que como se ha dicho antes se tiene que adaptar la forma para conseguir que se ajuste a los puertos del elemento radiante.

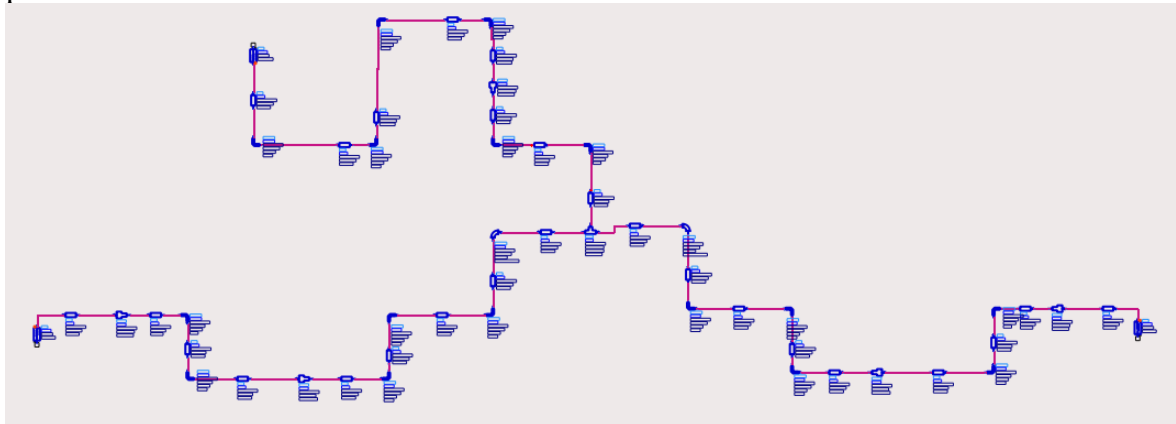


Figura 9-5: Divisor horizontal

Como se tiene el diseño del divisor horizontal, se pasa a añadir el stub que da el desfase de 180° . En este caso, el stub está en la rama de la derecha ya que se necesita que haya 180° más en ese lado.

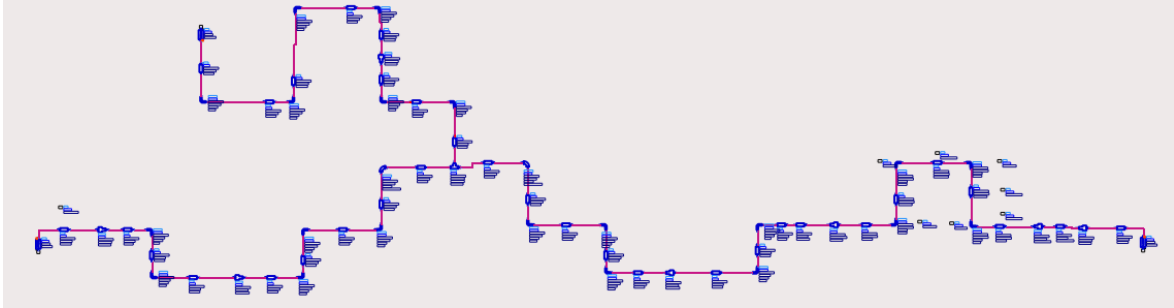


Figura 9-6: Divisor horizontal con stub

Para finalizar la red de alimentación, falta explicar cómo se ha diseñado el Branchline.

El Branchline se ha diseñado siguiendo los pasos explicados en la asignatura de Medios de Transmisión [9]. Como se puede ver en la figura 9-7 se utilizan una serie de impedancias, unas de valor fijo y otras variables, y jugando con ello se consigue dicho diseño.

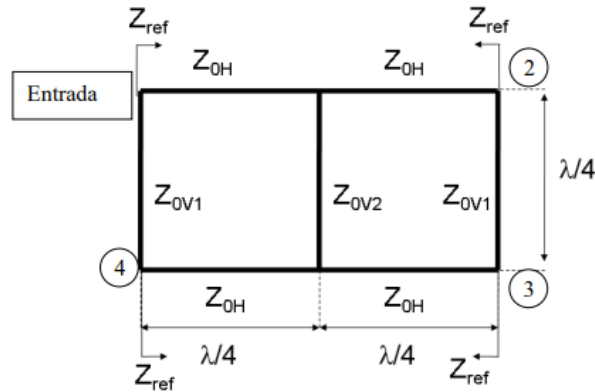


Figura 9-7: Branchline [9]

Tabla 9-2: Impedancias del Branchline

Z_{ref}	Z_{0H}	Z_{0V1}	Z_{0V2}
36 Ω	40 Ω	86.9117 Ω	62.8539 Ω

En este caso se ha tomado como impedancias fijas Z_{ref} y Z_{0H} y con las siguientes fórmulas [9] se obtienen Z_{0V1} y Z_{0V2} .

$$Z_{0V1} = Z_{ref} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + K^2}}{K} \quad Z_{0V2} = Z_{0H}^2 \cdot \frac{Z_{ref}^2 + Z_{0V1}^2}{(2Z_{0V1}Z_{ref}^2)}$$

Como se tienen las impedancias se puede diseñar directamente el Branchline metiendo dichas impedancias en linecalc y obteniendo su longitud y anchura.

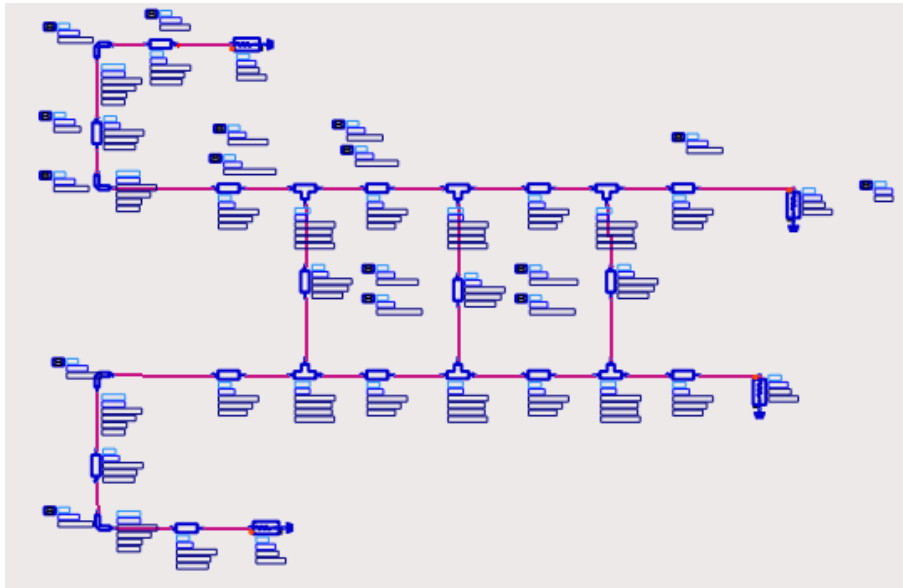


Figura 9-8: Diseño Branchline

Para finalizar, se le han añadido stubs al Branchline para conseguir reducir su longitud total, obtener una mejor adaptación y conseguir la fase que se necesita.

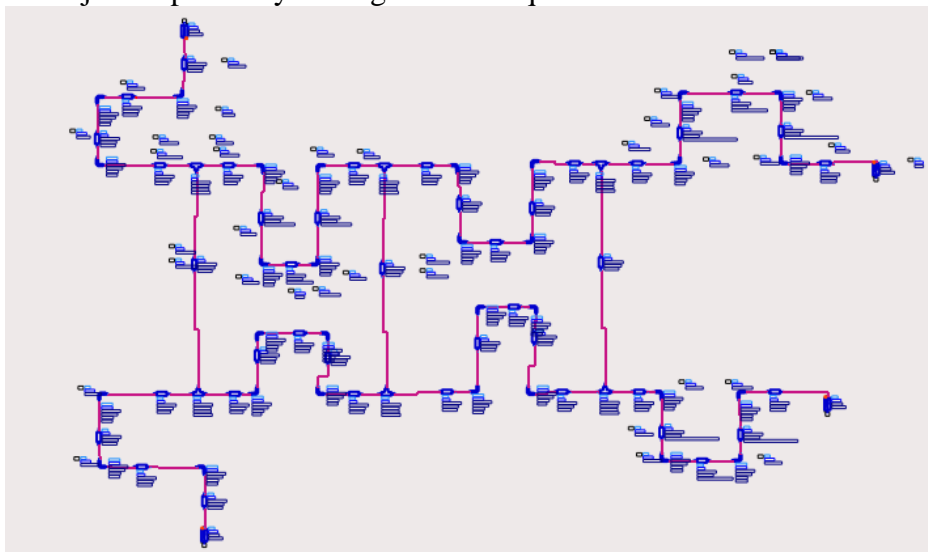


Figura 9-9: Diseño Branchline con stubs

9.3 Unión red de alimentación

Una vez se ha conseguido diseñar por separado los tres componentes de la red de alimentación se procede a su unión en CST. Se exportan de ADS los ficheros de los divisores y Branchline, y se importan en CST.

En CST se parte colocando las dos vías que unen el Branchline con los divisores, una de las vías une el Branchline con el divisor vertical y la otra vía el Branchline con el divisor horizontal. Con las vías se sitúa el Branchline y cada uno de los divisores en distintas capas para conseguir utilizar el menor largo posible para poder ajustarlo a las medidas del elemento radiante.

Cuando se han colocado las vías se importan los componentes de la red y se sitúan en la capa que les corresponde. Después de ubicar los elementos se importan las vías que unirán los divisores con los conectores SMA de la antena y las vías que se utilizan para alimentar el diseño final a través del Branchline. Todas estas vías han sido diseñadas previamente y se importan al diseño para unir la red de alimentación.

Para continuar el diseño de la red, se diseñan y colocan los planos de masa y los dieléctricos ajustándolos con las vías y los componentes previamente situados.

Finalmente se unen todos los componentes de la red con las vías; para formar un único componente, se simula y se realizan los últimos ajustes para conseguir obtener la respuesta correcta.

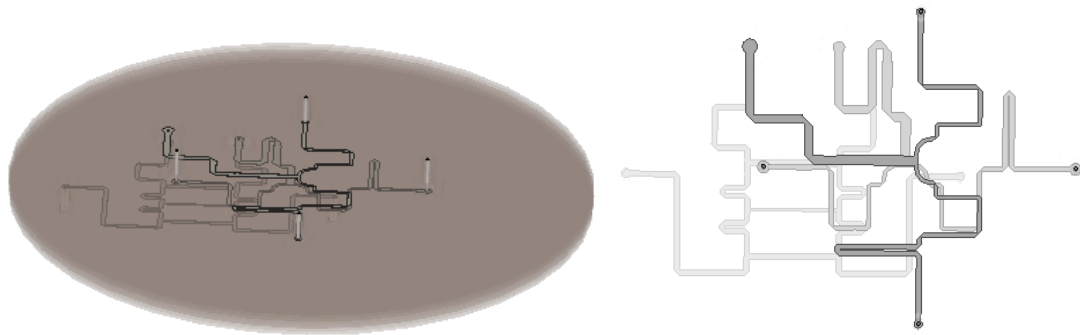


Figura 9-10: Red de alimentación

9.4 Diseño vías

Las vías se han diseñado para poder pasar de una capa a otra al unir la red de alimentación, ya que por las medidas del elemento radiante se necesita que los componentes de la red de alimentación estén en distintas capas [25].

Estas vías se han diseñado y optimizado por separado para luego importarlas al diseño final en el que se une a la red.

Se ha diseñado cuatro tipos de vías distintos:

- La primera vía es la que une el Branchline con el divisor horizontal, está vía atraviesa una capa para pasar de la capa en la que se encuentra el Branchline hasta la que se debe colocar el divisor.
- La segunda vía que se diseña atraviesa dos capas, ya que se pasa de la capa en la que está el Branchline hasta la capa en la que se encuentra el divisor vertical pasando por la capa del divisor horizontal.
- La tercera vía que se construye pasa a través de dos capas, va desde el divisor horizontal hasta el conector SMA de la antena, pasando por la capa del divisor vertical.
- La última vía se conecta al divisor vertical y atravesando una capa se une con el conector SMA del elemento radiante.

Se va a explicar el diseño de la primera vía ya que en el caso de las vías que atraviesan dos capas será igual que este caso, pero repitiendo dos veces el proceso. Para diseñarlas se empieza colocando los planos de masa los cuales tienen un espesor de 0.035 mm y los dieléctricos cuyo espesor es de 1.524 mm; la composición será plano de masa - dieléctrico

– dieléctrico – plano de masa – dieléctrico – dieléctrico – plano de masa. Una vez se tiene la estructura de la vía se realizan dos tramos de pista, uno irá conectado y tendrá la anchura de la pista del Branchline y el otro irá conectado y tendrá el ancho de pista del divisor. Cada tramo de pista se unirá a un círculo con el que a partir de la variación de su radio se consigue una mejor adaptación. Cuando se han unido las pistas con los círculos, se le añade un conductor que junta los dos componentes (pista - círculo con pista - círculo) previamente diseñados. En el plano de masa del medio se tiene que realizar un hueco para que pase el conductor, como ocurriría con las dimensiones de los círculos; este hueco se irá variando para obtener la mejor respuesta posible. Finalmente, faltaría añadir los pines, que son cilindros que van desde un plano de masa al superior; el último factor que se ha utilizado para la obtención de la respuesta óptima han sido el radio de dichos pines, así como la separación entre ellos.

En el caso de las vías que van unidas a los conectores SMA de la antena se seguirá el mismo procedimiento, pero en vez de utilizar dos pistas y dos círculos, se diseñará una pista con su círculo que a través del conductor irán unidos directamente al conector del elemento radiante.

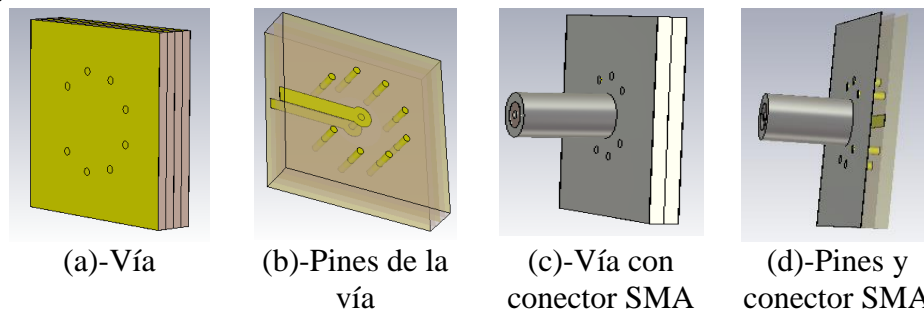


Figura 9-11: Vías

9.5 Conceptos teóricos

Este capítulo es la continuación del apartado del estado del arte en el que se describen algunos conceptos teóricos importantes para la correcta comprensión del TFG.

9.5.1 Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada se define como la polarización de la onda emitida (radiada) por la antena [5].

Existen tres tipos distintos de polarización:

- **Lineal:** El campo proyectado sobre el plano del observador lo hace sobre una recta ($AR = \infty$).
- **Circular:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia ($AR=1$). Dicho movimiento puede ser a derechas o izquierdas.
- **Elíptica:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse ($1 < AR < \infty$). Dicho movimiento puede ser a derechas o izquierdas.

En sistemas GNSS la antena receptora, así como la antena que se encuentra transmitiendo desde el satélite tienen polarización circular a derechas. Se prefiere la polarización circular

ya que una señal polarizada linealmente experimenta cambios en la polarización mientras viaja a través de la ionosfera debido al campo magnético de la Tierra [5].

9.5.2 Relación axial

La relación axial es la división entre los ejes de polarización. Para polarización lineal es infinito, para polarización circular es 1 y para polarización elíptica tiene que estar entre 1 e infinito.

9.5.3 Directividad y ganancia

La ganancia directiva es relación entre la intensidad de radiación de la antena en cada dirección del espacio, y la de una antena isotrópica que radiase la misma potencia [8].

La ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta la ganancia directiva de un elemento radiante en la dirección de máxima radiación [14, 8].

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi \frac{r^2 |\vec{S}(r, \theta, \phi)|}{P_{rad}} \quad (1)$$

9.5.4 Centro de fase

El centro de fase de una antena receptora GNSS se define como un punto donde se recoge la señal transmitida desde el satélite; por lo tanto, también es el punto de referencia de todas las mediciones [5].

Con las ecuaciones que se ven en la figura 2-10, se muestra la diferencia de retardos en diferentes direcciones debido a las variaciones del frente de fase.

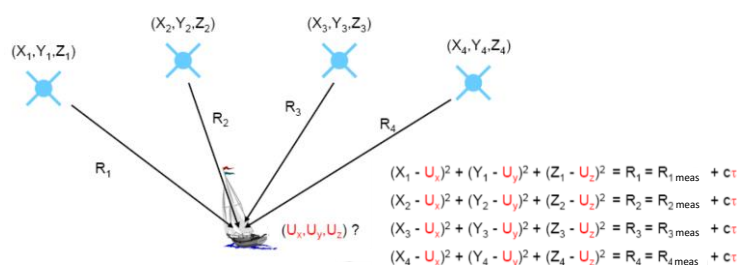


Figura 9-12: Ecuaciones del centro de fase [26]

9.5.5 Bandas de frecuencia y longitud de onda

En la siguiente tabla se puede apreciar las distintas bandas de frecuencia con sus respectivas longitudes de onda. Como se puede ver en la tabla que se tiene a continuación, la banda de frecuencias que se utiliza para los sistemas GNSS (1.2 GHz – 1.6 GHz) está dentro de la banda L.

Tabla 9-3: Bandas de frecuencias [8]

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
L	1-2 GHz	30 – 15 cm
S	2-4 GHz	15 – 7.5 cm

C	4-8 GHz	7.5 – 3.75 cm
X	8-12.4 GHz	3.75 – 2.42 cm
Ku	12.4-18 GHz	2.42 – 1.66 cm
K	18-26.5 GHz	1.66 – 1.11 cm
Ka	26.5-40 GHz	11.1 – 7.5 mm
Mm	40-300 GHz	7.5 – 1 mm

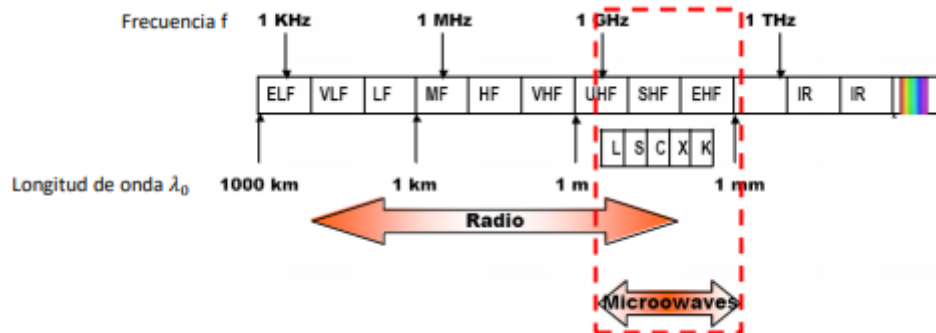


Figura 9-13: Bandas de frecuencia [8]

9.5.6 Parámetros S

Los parámetros S se pueden definir como una red de n puertos como se muestra en la figura 9-14, en la que a la entrada se añade una onda de potencia entrante a_i y se obtiene a la salida una onda de potencia saliente b_i . En el cual cada onda tiene asociada una impedancia de referencia Z_{oi} [1, 2].

$$a_k = \frac{v_k + i_k Z_{ok}}{\sqrt{8Z_{ok}}} \quad b_k = \frac{v_k - i_k Z_{ok}}{\sqrt{8Z_{ok}}}$$

A partir de las fórmulas anteriores se sacan la potencia de entrada y de salida, y con esto se obtienen los valores de los parámetros S [9].

Coefficiente de reflexión:

$$S_{ii} = \left. \frac{b_i}{a_i} \right|_{a_k=0, k \neq i}$$

Coefficiente de transmisión:

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_k=0, k \neq i}$$

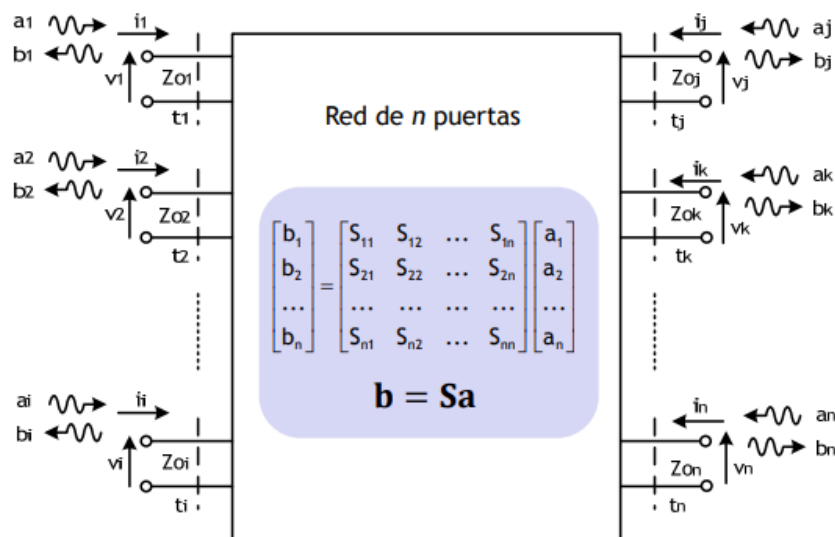


Figura 9-14: Parámetros S [9]

9.6 Requisitos del sistema

Se van a mostrar en las siguientes tablas los requisitos que se han tenido que cumplir en la realización del diseño de la antena.

Tabla 9-4: Requisitos

Parámetros	Valores
Bandas de frecuencia	L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 y E6
Polarización	RHCP
VSWR	2:1
Estabilidad centro de fase	< 2 mm
Conector	50 Ω
Ancho de banda	1.2-1.6 GHz
Dimensiones	Φ 380x170 altura mm

Tabla 9-5: Características del diseño final

Parámetros	Valores
Bandas de frecuencia	L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 y E6
Polarización	RHCP
VSWR	2:1
Estabilidad centro de fase	< 2.3 en la banda inferior < 5.7 en la banda superior
Conector	50 Ω
Ancho de banda	1.2-1.6 GHz
Dimensiones	Φ 250x54.281 altura mm

La antena final que se ha diseñado trabaja en todas las bandas de frecuencia de GNSS mientras que las antenas comerciales están enfocadas a algunas bandas específicas. Este diseño al igual que las antenas comerciales tiene polarización circular a derechas (RHCP), un valor de VSWR de 2:1 y un conector de 50 Ω . Respecto a las dimensiones el diseño realizado en el TFG es más pequeño que las dimensiones generales de las antenas

comerciales, ya que el diámetro son 250 mm y la altura 55 mm aproximadamente en el caso del TFG mientras que en las comerciales el diámetro es aproximadamente es de 380mm y la altura de 170mm.

La estabilidad del centro de fase como se ve en la tabla 9-5 es menor a 2.3 en la banda inferior y menor a 5.7 en la banda superior, mientras que en las antenas comerciales es menor a 2. Esta estabilidad habría que mejorarla para conseguir el resultado óptimo.

9.7 Comparativas

En este anexo se van a enseñar algunas pruebas realizadas para la obtención final del diseño, ya que previamente a conseguir los resultados óptimos se han probado distintos casos para ver su comportamiento.

9.7.1 Dipolos (Polarizador)

En primer lugar, se va a mostrar las distintas respuestas obtenidas a partir de la modificación de los dipolos que actúan como polarizador. Se van a exponer tres casos distintos, además del caso final que se ha utilizado.

- Caso 1: diseño con los dipolos óptimos, los utilizados en el diseño final.

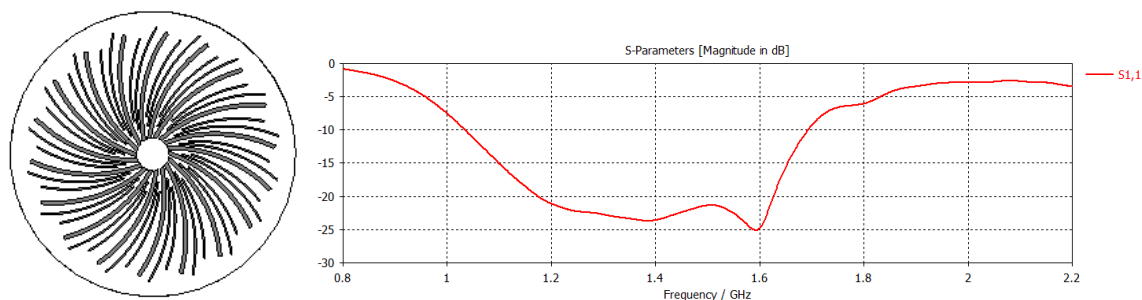


Figura 9-15: Dipolos óptimos

- Caso 2: diseño con los dipolos más cortos que los del caso 1.

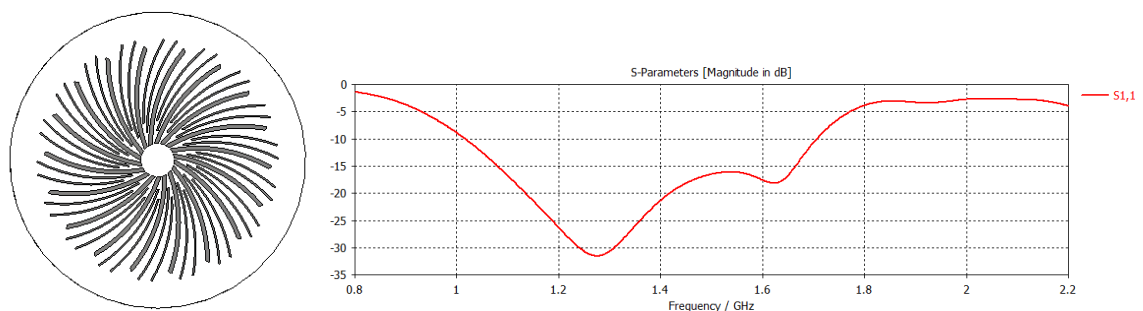


Figura 9-16: Dipolos cortos

- Caso 3: diseño con los dipolos más largos que en el primer caso.

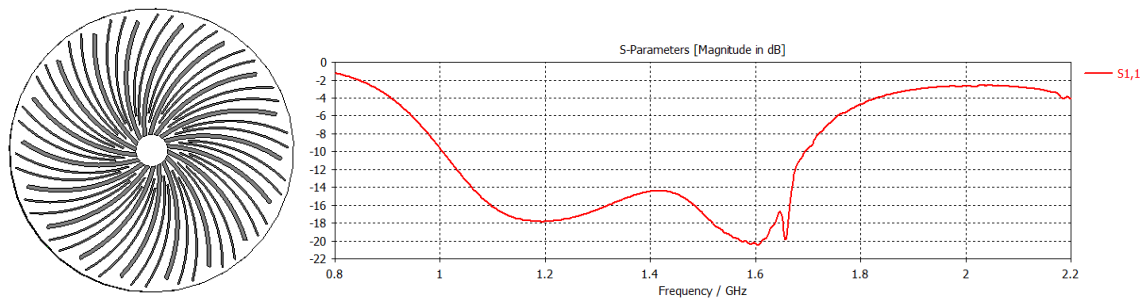


Figura 9-17: Dipolos largos

- Caso 4: diseño con los dipolos de la misma longitud que los óptimos, pero más curvos.

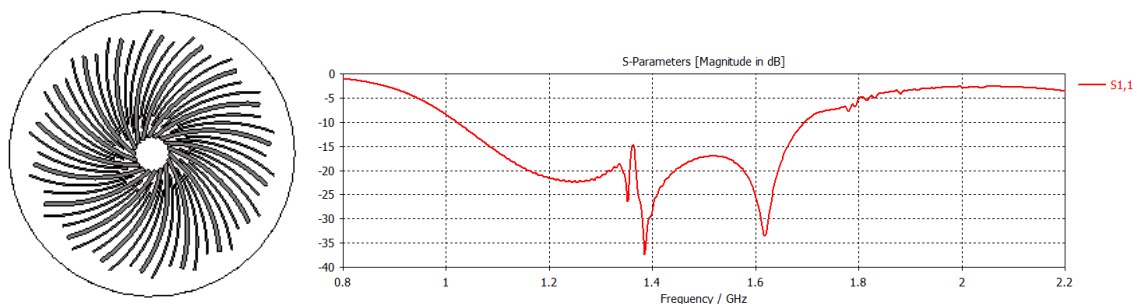


Figura 9-18: Dipolos curvos

Como se puede analizar en las figuras anteriores en los casos 2, 3 y 4 se consigue una peor adaptación en el parámetro S11, por ello tras el estudio realizado se decidió continuar con la forma y tamaño de los dipolos del caso 1.

9.7.2 Cavidad

En la siguiente comparativa se va a enseñar la diferencia que existe en la respuesta del parámetro S11 cuando se pone el mismo espesor y altura a toda la cavidad, o cuando se ponen dos espesores distintos. En este caso solo se puede variar el espesor debido a que el diámetro de la cavidad tiene que ser fijo, ya que tiene que ser el mismo que el de la red de alimentación.

Como se puede apreciar en la figura 9-19 cuando se tiene una cavidad uniforme se obtiene una respuesta del parámetro S11 de -10 dB, mientras que cuando se utilizan dos espesores distintos como se ve en la figura 9-20, se consigue una respuesta de -12 dB. Luego se puede ver que cuando se utilizan dos espesores distintos se mejora la adaptación del parámetro S11.

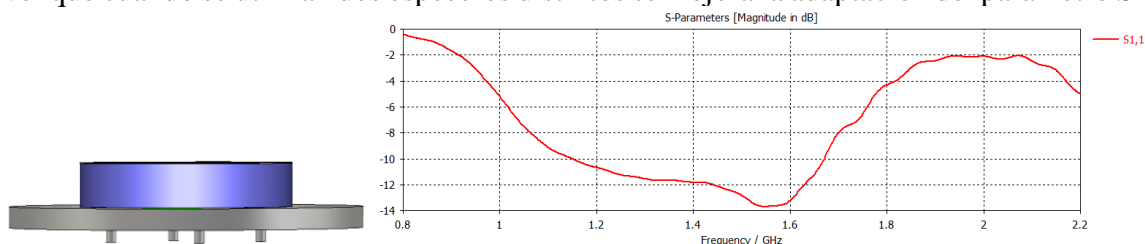


Figura 9-19: Cavidad uniforme

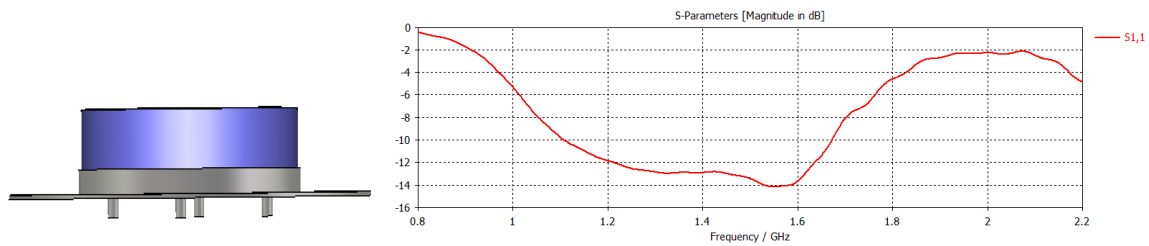


Figura 9-20: Cavity distinto espesor

9.7.3 Red de alimentación con o sin stubs (ADS)

En un primer diseño de los divisores se decidió ajustar la fase quitando la longitud equivalente a 90° al lado del divisor que tiene fase de 0° y añadiéndolo al lado que se necesita una fase de 180° . Se tiene que añadir o quitar a cada rama 28.6215 mm que es el equivalente a 90° .

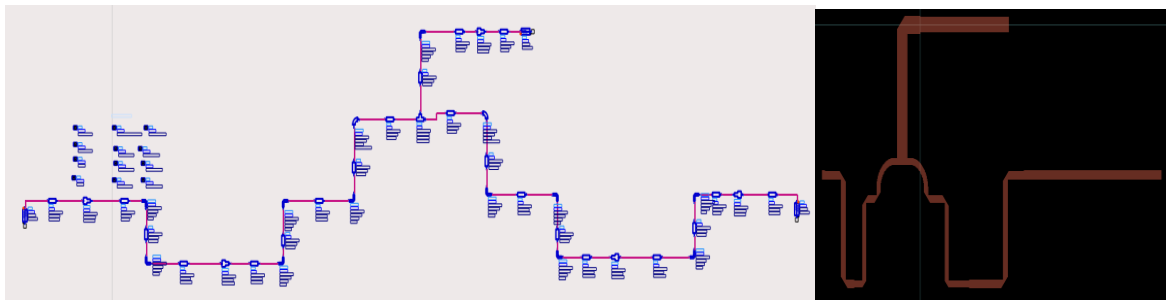


Figura 9-21: Divisor vertical

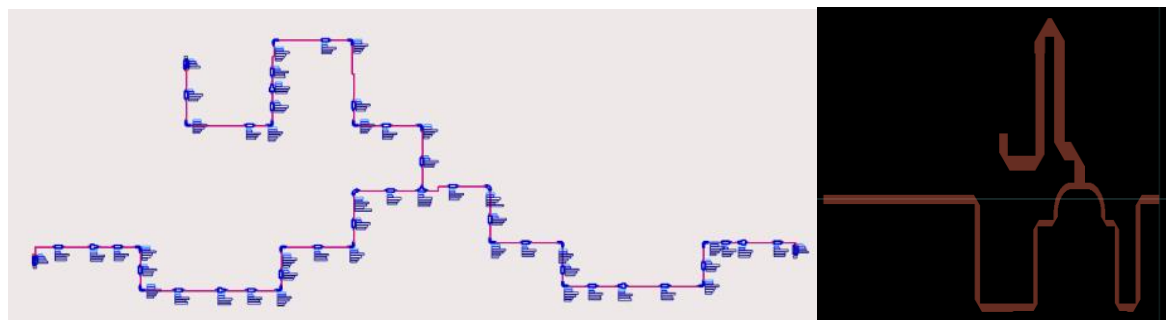


Figura 9-22: Divisor horizontal

Con este diseño no se conseguía la fase necesaria en el ancho de banda requerido, se necesitaban 180° entre 1.2 GHz y 1.6 GHz y solo se conseguía de 1.38 GHz a 1.42 GHz luego se decidió probar otra forma de obtener la fase necesaria para el diseño.

Para mejorar la fase se puso un stub, como se muestra en la figura 9-23 y 9-24 a la rama que se quisiese desfasar 180° respecto de la otra rama. Con esto se logra tener la fase necesaria en 80 MHz en vez de los 40 MHz que se tenían antes.

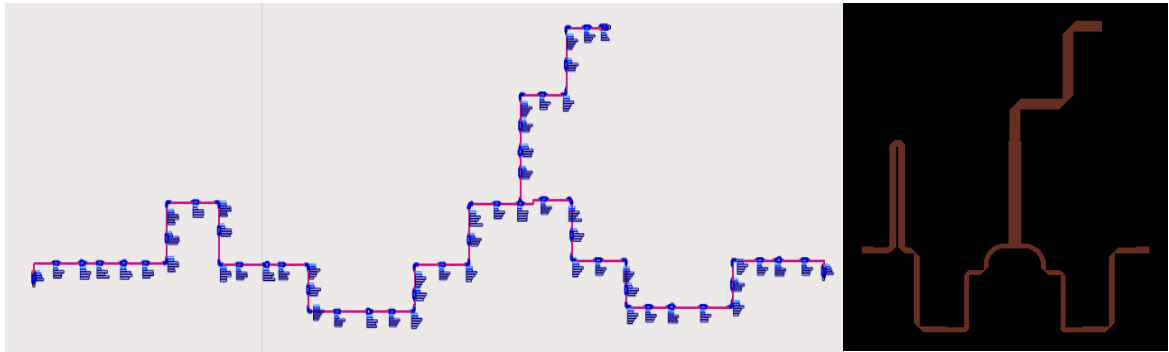


Figura 9-23: Divisor vertical

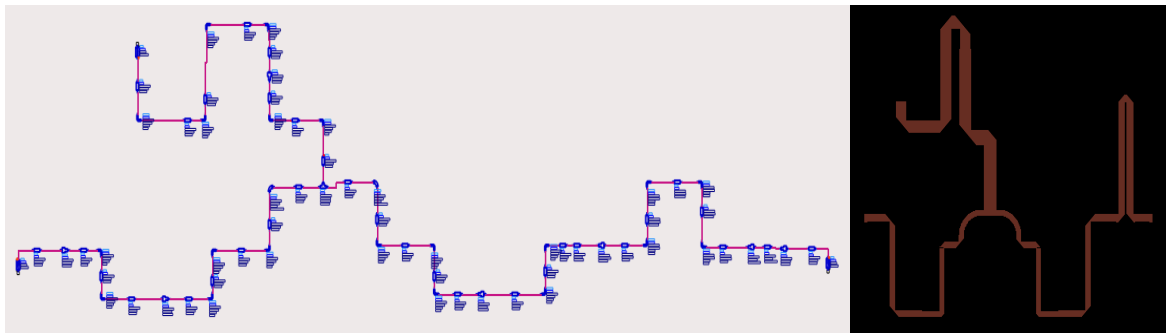


Figura 9-24: Divisor horizontal

Además, como se aprecia en las figuras 9-25 y 9-26 en el diseño con stubs se consigue una mejor respuesta del parámetro S11 que en el caso que se utilizan las longitudes para ajustar la fase.

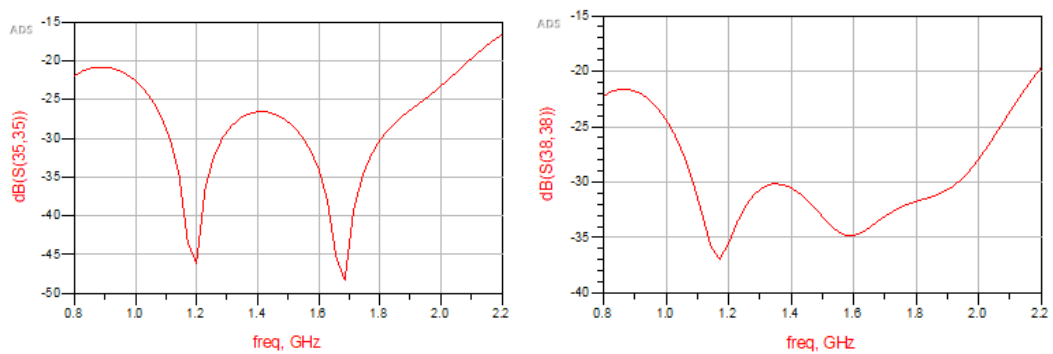


Figura 9-25: Respuesta S11 divisores

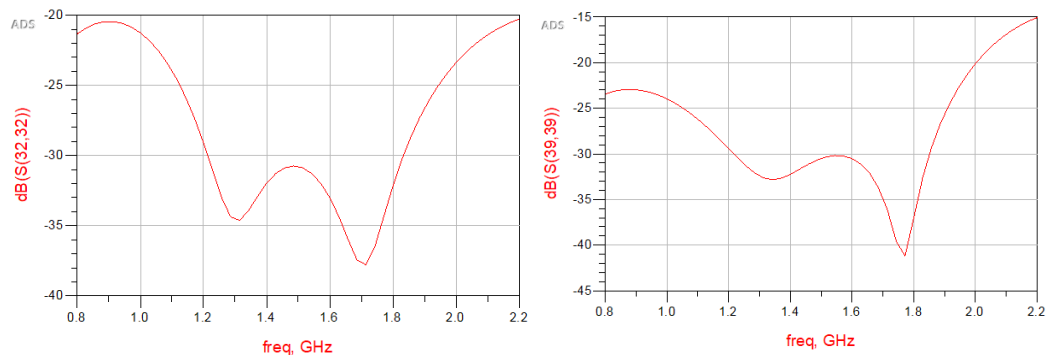


Figura 9-26: Respuesta S11 divisores con stub

9.7.4 Red de alimentación unida

El primer diseño que se obtuvo al importar los ficheros de ADS es el que se observa en la figura 9-27, la adaptación que se consigue no es del todo buena, así que se procede a mejorarla. Primero se modifica la separación y longitud de los stubs de dentro de los anillos del Branchline, consiguiendo mejorar la respuesta del parámetro S11. Después de ver la mejora de dicho parámetro, se ve que hay acoplo entre las líneas de dentro de los anillos luego se decide colocar los filtros hacia afuera como se presenta en la figura 9-29, obteniendo con esto la respuesta óptima de la red.

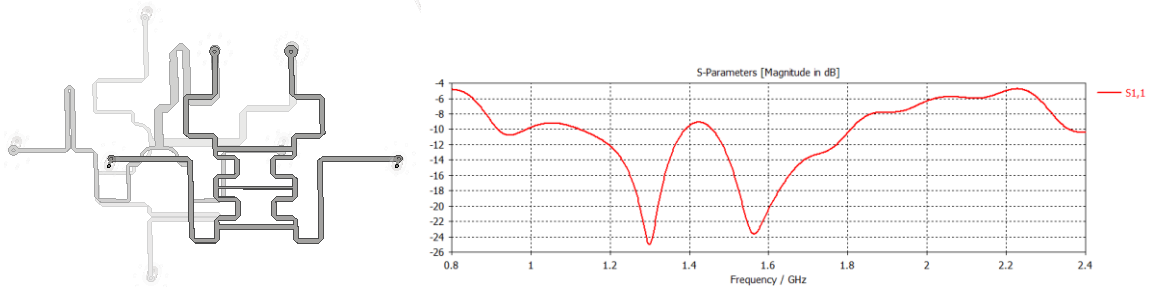


Figura 9-27: Red de alimentación sin cambios

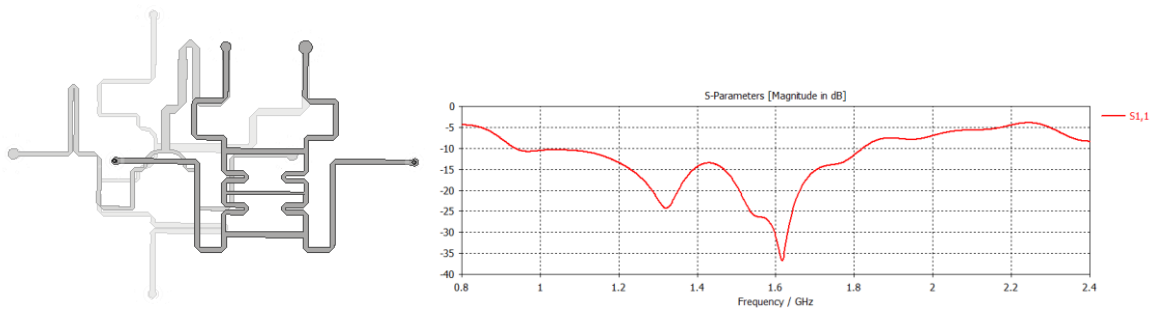


Figura 9-28: Red de alimentación variando stubs

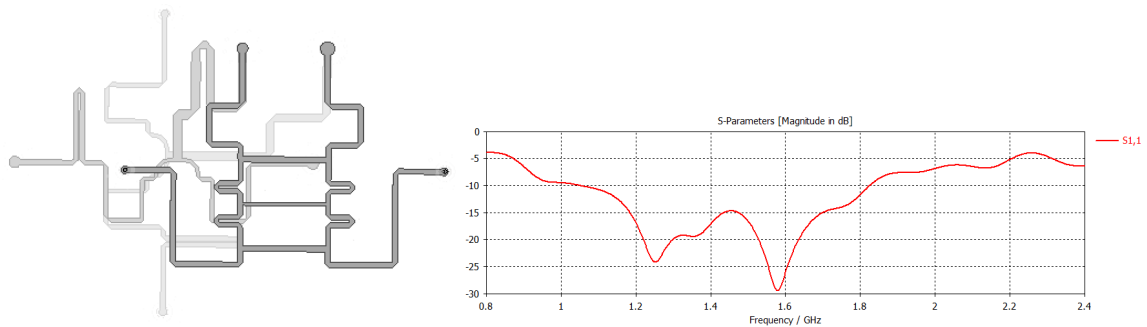


Figura 9-29: Red de alimentación poniendo stubs hacia fuera

9.8 Materiales

En la siguiente tabla se muestran las principales características de cada uno de los materiales utilizados en el diseño.

Tabla 9-6: Características de los materiales

Material	Epsilon	Mu	Tangente de pérdidas
Foam	1.1	1	0.001

Foam_Ht_80	1.09	1	0.0009
FR4	3.9	1	0.002
PEC	-	-	-
Taconic RF-35	3.5	1	0.0018
Teflon	2.1	1	0.0002
Vacuum	1	1	0

Cada uno de los componentes que formaban el elemento radiante están formados por un material distinto. A continuación, en la tabla 9-7 se muestra cada uno de ellos.

Tabla 9-7: Materiales del elemento radiante

Elemento	Plano de masa	Circulo 1	Sustrato parche	Parche	Circulo 2	Sustrato dipolos	Dipolos
Material	PEC (conductor perfecto)	Foam	FR4	PEC (conductor perfecto)	Foam_Ht80	FR4	PEC (conductor perfecto)

Y en la tabla 9-8 se van a enseñar los materiales de la red de alimentación.

Tabla 9-8: Materiales de la red de alimentación

Elemento	Dieléctricos	Planos de masa	Red de alimentación	Pines	Conector SMA
Material	Taconic RF-35	PEC (conductor perfecto)	PEC (conductor perfecto)	PEC (conductor perfecto)	PEC (conductor perfecto) Teflon

9.9 Programas utilizados

Para la correcta elaboración de este TFG se ha necesitado hacer uso de distintos programas para así conseguir los resultados fijados. Para la obtención de dichos objetivos se ha utilizado CST, en este programa se ha diseñado y optimizado el elemento radiante, y ADS donde se ha realizado la red de alimentación.

La primera que se va a explicar es CST. Es un programa muy completo que se utiliza para el diseño en 3D de antenas de todo tipo, así como la obtención de los resultados después de la simulación. En el caso del TFG con CST se ha diseñado la antena y también se ha unido la red de alimentación y la antena final.

Dentro de CST hay distintos apartados para poder realizar las distintas tareas y acciones necesarias dentro del programa. Los principales apartados que se pueden encontrar son: Home, Modeling, Simulation, Post Processing y View.

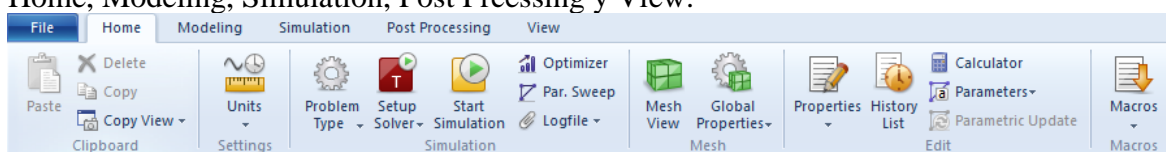


Figura 9-30: CST

El segundo programa que se ha utilizado es ADS, este programa se ha utilizado para el diseño de la red de alimentación.

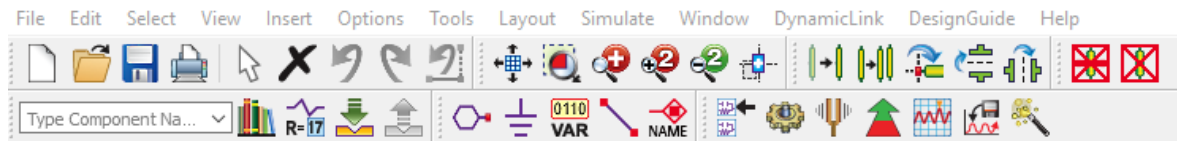


Figura 9-31: ADS

Además de esto se ha usado una herramienta llamada linecalc para calcular las medidas de una línea de transmisión, ya que poniendo su impedancia te muestra su longitud y anchura.

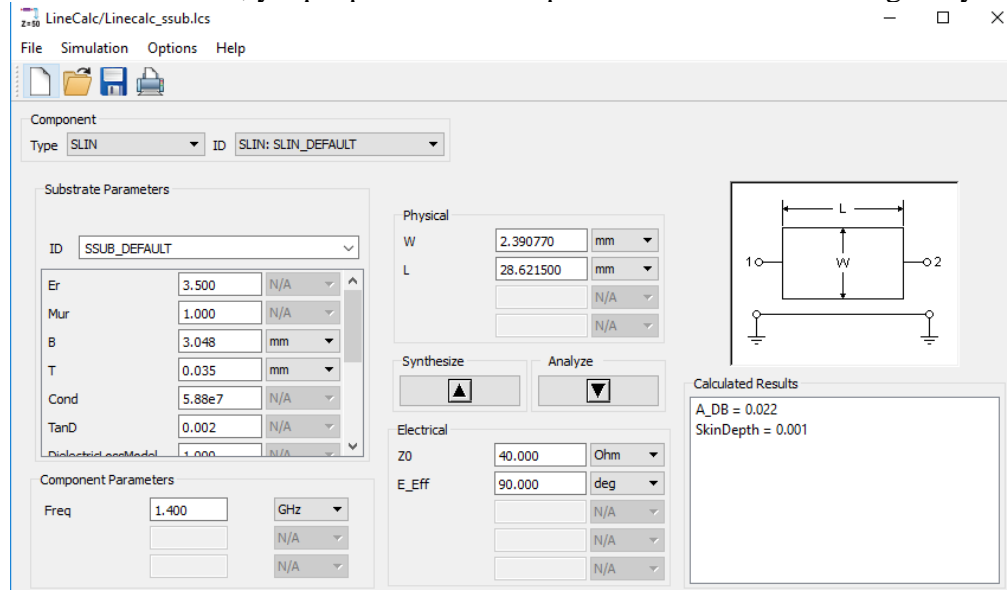


Figura 9-32: Linecalc

9.10 Construcción

Una vez se ha unido el elemento radiante con la red de alimentación en CST, se procede a la construcción de la antena al completo.

Para la construcción es necesario sacar unos documentos llamados Gerber los cuales serán enviados para la posterior construcción de dicha antena.

Para terminar, cuando se ha construido la antena final se mide en la cámara anecoica, y se comparan los resultados obtenidos en CST con los obtenidos a partir de las mediciones en la cámara anecoica.

